



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Departamento de Ciências do Mar

Ana Catarina Leitão Torres

Modelação da Acústica Submarina e Previsão Sonar

Desenvolvimento de uma Ferramenta de Modelação

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na
especialidade de Marinha



Alfeite

2019



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Ana Catarina Leitão Torres

Modelação da Acústica Submarina e Previsão Sonar

Desenvolvimento de uma Ferramenta de Modelação

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na
especialidade de Marinha

Orientação de: CMG Carlos Nélson Lopes da Costa

O aluno mestrando,

O orientador,

ASPOF Leitão Torres

CMG Lopes da Costa

Alfeite

2019

Epígrafe

“Know that life is not fair and that you will fail often. But if take you take some risks, step up when the times are toughest, face down the bullies, lift up the downtrodden and never, ever give up — if you do these things, then the next generation and the generations that follow will live in a world far better than the one we have today.

And what started here will indeed have changed the world — for the better.”

Almirante William H. McRaven

Dedicatória

Dedico esta dissertação de mestrado aos futuros aspirantes e cadetes da Escola Naval, que sintam apelo pela Acústica Submarina e pela Previsão Sonar. Estas áreas ainda por explorar são, sem dúvida, uma necessidade da comunidade operacional.

Agradecimentos

Já dizia Jean-Jacques Rousseau, expoente filósofo iluminista, que desde o nosso nascimento somos instruídos, todos os indivíduos e circunstâncias contribuem para o nosso crescimento intelectual e sobretudo para os valores e crenças que nos definem. Assim, não me é possível agradecer a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento e escrita desta dissertação. Mencionarei apenas aqueles que num âmbito mais naval e pessoal estiveram presentes diariamente, contudo guardo todos num cantinho especial e sem dúvida que não são esquecidos.

Começo por agradecer à minha família, meu constante porto de abrigo perante as adversidades da vida, e onde encontrei sempre mar chão para recuperar do mau tempo que muitas vezes marca a vida do dia-a-dia, sendo um exemplo que após a tempestade vem a bonança. Sei que irão sempre guardar as minhas seis horas com especial alento, e estarei cá sempre para guardar as vossas.

Ao meu orientador Capitão de Mar-e-Guerra Carlos Nélon Lopes da Costa, este ano foi repleto de desafios acústicos e físicos, que significaram longas horas de trabalho e muitos nós na cabeça, mas julgo que deixamos para as gerações vindouras uma ferramenta importante que quiçá motivará a futuros estudos nesta área. Obrigado pela porta do gabinete aberta e uma resposta sempre pronta aos *emails*, por vezes muito tardios. Ao professor Miguel Moreira e ao professor Mário Gatta, pela ajuda constante nos desafios matemáticos que tanto caracterizam estes trabalhos acústicos, mas que aos poucos foram ultrapassados.

Ao meu curso Jorge Álvares, pelos últimos cinco anos que vivemos juntos, que nos fizeram crescer e cujas peripécias guardaremos sempre e iremos recordar nas futuras reuniões e jantares de curso.

À câmara de oficiais do NRP “Álvares Cabral”, com cujos conselhos e apoio sempre contei, foi notável a disponibilidade oferecida nos testes efetuados a bordo e nas apresentações realizadas, nas quais foi possível obter uma visão mais concreta da realidade operacional.

Resumo

A acústica submarina está na base das operações anti-submarinas realizadas a bordo das unidades navais. A elevada superioridade tática que os submarinos detêm, torna relevante o desenvolvimento de ferramentas operacionais de previsão sonar, que permitam aos navios conhecer a probabilidade e alcance de deteção destas plataformas, para que o sonar seja empregue no sentido de aumentar as hipóteses de deteção, e consequentemente aumentar o desempenho ASW (*Anti-Submarine Warfare*) das unidades navais.

Assim, foi construída uma ferramenta operacional que responda às necessidades da Marinha Portuguesa, denominada de SeaRider, que engloba os quatro fatores que influenciam a previsão sonar: o equipamento acústico, o meio, o alvo e a plataforma. Devido à elevada complexidade que representa o ambiente submarino, e os fenómenos acústicos que ocorrem no seio deste, é necessário recorrer às equações sonar, que são simples somas e subtrações dos diversos parâmetros considerados. Para tal, foi efetuado um estudo das variáveis que influenciam individualmente cada parâmetro, no sentido de representar a realidade com o maior rigor possível.

Através deste programa são conhecidos os perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som na coluna de água; o mapa e o perfil batimétrico do fundo do mar; o traçado de raios sonoros e interações dos mesmos com o fundo e a superfície; os gráficos de excesso de sinal e alcances de deteção e contra deteção. Com todas estas variáveis, os operadores desta ferramenta operacional detêm total conhecimento do ambiente submarino.

Assim, o SeaRider apresenta as seguintes vantagens: recorre à climatologia para a obtenção dos perfis de temperatura e salinidade, à escala mundial, nas resoluções de 1 e de 0,25 graus de latitude e de longitude, da *World Ocean Database* 2018 (fonte aberta) da NOAA, incluindo as climatologias de médias anuais, mensais e estações do ano; calcula o perfil batimétrico através da batimetria GEBCO do oceano, na resolução espacial de 0,5 milhas; usa uma abordagem coerente e automática para o cálculo do ruído ambiente e próprio e permite a entrada de dados de XBT, BT, CTD e SVP.

Palavras-chave: SeaRider, Acústica Submarina, Previsão Sonar, MATLAB, WOD18, GSW, TEOS-10, GEBCO, *raytracing*

Abstract

Underwater acoustics encompasses the anti-submarine operations performed on board the naval units. The high tactical superiority of submarines makes it important to develop operational sonar prediction tools that will allow ships to know the probability and range of detection of these platforms, so that sonar can be employed to increase detection chances, and consequently increase ASW (Anti-Submarine Warfare) performance of naval units.

Thus, an operational tool was built that responds to the needs of the Portuguese Navy, called SeaRider, which encompasses the four factors that influence sonar prediction: the acoustic equipment, the environment, the target and the platform. Due to the high complexity that represents the underwater environment, and the acoustic phenomena that occur within it, it is necessary to resort to sonar equations, which are simple sums and subtractions of the various parameters considered. To this end, a study was made of the variables that individually influence each parameter, in order to represent reality as accurately as possible.

Through this software the temperature, salinity and sound velocity profiles in the water column are known; the map and bathymetric profile of the seabed; the tracing of sound rays and their interactions with the bottom and surface; over signal and detection and counter detection ranges. With all these variables, the operators of this operating tool have full knowledge of the underwater environment.

SeaRider has the following advantages: it uses climatology to obtain world-wide temperature and salinity profiles at 1 and 0.25 degree latitude and longitude resolutions from the World Ocean Database 2018 (open source) from NOAA, including annual, monthly and seasonal averages; calculates the bathymetric profile using the GEBCO ocean bathymetry at a spatial resolution of 0.5 miles; uses a coherent and automatic approach to the calculation of ambient and own noise and allows input of XBT, BT, CTD and SVP data.

Keywords: SeaRider, Underwater Acoustic, Sonar Prediction, MATLAB, WOD18, GSW, TEOS-10, GEBCO, raytracing

Índice

Epígrafe	I
Dedicatória.....	III
Agradecimentos.....	V
Resumo	VII
<i>Abstract</i>	IX
Lista de Abreviaturas e Acrónimos	XV
Índice de Figuras	XVII
Índice de Tabelas	XXIII
Introdução.....	1
Enquadramento Geral.....	1
Âmbito, Objetivos e Metodologia da Dissertação	2
Pertinência do Tema.....	3
Estrutura da Dissertação	4
Capítulo 1. Enquadramento Teórico	7
1.1. Introdução à Acústica Submarina	7
1.2. Equações Sonar	7
1.2.1. Equação do Sonar Ativo	9
1.2.2. Equação do Sonar Passivo.....	10
1.2.3. Excesso de Sinal.....	10
1.2.4. Figura de Mérito.....	11
1.3. Nível de Intensidade Espectral e Nível de Banda	11
1.4. Nível de Intensidade	12
1.5. Índice de Diretividade	14
1.5.1. Índice de Diretividade dos Sonares Usados a Bordo	16
1.6. Nível de Ruído	17
1.6.1. Nível de Ruído Ambiente	18
1.6.2. Ruído Irradiado	20
1.6.3. Nível de Ruído Próprio	22
1.7. Nível de Reverberação.....	24
1.8. Perdas de Transmissão	29

1.8.1.	Perdas por Dispersão Geométrica.....	30
1.8.2.	Perdas por Absorção	31
1.8.2.1.	Fórmulas para o Cálculo do Coeficiente de Absorção.....	33
1.9.	Refletividade do Alvo	37
1.9.1.	Refletividade de Formas Geométricas Simples	39
1.9.2.	Refletividade para Submarinos.....	41
1.9.3.	Refletividade para Minas.....	43
1.9.4.	Refletividade para Torpedos	43
1.10.	Limiar de Detecção	43
1.11.	Teoria do Traçado de Raios Sonoros	47
Capítulo 2. Desenvolvimento da Ferramenta		53
2.1.	SeaRider	54
2.2.	Base de Dados	55
2.3.	Inclusão de XBT e XSV	56
2.4.	Bases de Dados Batimétricos GEBCO.....	59
2.5.	Perfil Batimétrico.....	60
2.6.	Função <i>Raytrace</i>	63
2.7.	Funções TEOS-10.....	64
2.8.	Cálculo de Distâncias Percorridas por cada Raio Sonoro	66
2.9.	Interações dos Raios Sonoros com a Superfície e o Fundo.....	67
2.10.	Cálculo do Ruído Ambiente Espectral.....	69
2.10.1.	Interpolação e Extrapolação.....	70
2.10.2.	Método dos Mínimos Quadrados.....	71
2.11.	Cálculo do Coeficiente de Absorção	74
2.12.	Cálculo do Ruído Próprio	78
2.13.	Métodos de Cálculo de Perdas de Transmissão.....	79
2.14.	Nível de Reverberação.....	83
2.15.	Cálculo do Excesso de Sinal e do Alcance	88
Capítulo 3. Discussão de Resultados.....		91
3.1.	Comparação dos Perfis Obtidos com o CTD, a Sonda XBT e a Climatologia	92
3.2.	Comparação entre Métodos de Cálculo de Perdas de Transmissão	98

3.3. Comparação entre Modos de Operação do Sonar	101
3.4. Influência dos Diversos Parâmetros para a Previsão Sonar	102
3.5. Corridas de Testes para Diversas Posições Geográficas de Interesse	105
Capítulo 4. Comparação entre FAPSO, <i>Raypath</i> e SeaRider.....	115
4.1. <i>Raypath</i> 3.0.....	115
4.1.2. Análise do <i>Raypath</i> 3.0	119
4.2. FAPSO	121
4.2.2. Análise do FAPSO.....	124
4.3. Comparação entre as Previsões Sonares do FAPSO, <i>RAYPATH</i> e SeaRider	126
Conclusões	129
Referências Bibliográficas	133
Apêndice A – Resumo alargado.....	135
Apêndice B – Manual de Utilizador do SeaRider.....	143
Apêndice C – Resultados obtidos durante o CTPH19	151
Apêndice D – Artigo Publicado e Apresentado na Conferência Inter Noise 2019.....	153
Apêndice E – Artigo para o Encontro Anual de Ciências e Tecnologias Militares 2018, Instituto Universitário Militar, Lisboa, 12 de dezembro de 2019.....	167
Apêndice F – Código do Programa.....	171

Lista de Abreviaturas e Acrónimos

.csv	<i>comma separated values</i> /valores separados por vírgulas
ANL	<i>Ambient-Noise Level</i> /Nível de Ruído Ambiente
ASW	<i>Anti-Submarine Warfare</i> /Operações Anti-submarinas
BL	<i>Bottom Losses</i> /Perdas por Reflexões no Fundo
BS	<i>Backscattering</i> /Retorno por reflexões aleatórias
CDR	<i>CounterDetection Range</i> /Contra deteção
CTD	<i>Conductivity Temperature and Depth Sensor</i> /Sensor para Medir Temperaturas, Condutividades e Imersões
DI	<i>Directivity Index</i> /Índice de Diretividade
DT	<i>Detection Threshold</i> /Limiar de Deteção
EOS	<i>Equation Of Seawater</i>
FAPSO	Ferramenta de Apoio à Previsão Sonar Operacional
FOM	<i>Figure of Merit</i> /Figura de Mérito
GEBCO	<i>General Bathymetric Charts of the Ocean</i> /Cartas Batimétricas Gerais do Oceano
GSW	<i>Gibbs-SeaWater Oceanographic Toolbox</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i> /Interface Gráfica com o Utilizador
IL	<i>Intensity Band Level</i> /Nível de Intensidade de Banda
ISL	<i>Intensity Spectrum Level</i> /Nível de Intensidade Espetral
METOC	<i>Meteorology and Oceanography</i> /Meteorologia e Oceanografia
NL	<i>Noise Level</i> /Nível de Ruído
NOAA	<i>National Oceanographic and Atmospheric Administration</i> /Agência Americana para o Oceano e Atmosfera
PSR	<i>Predicted Sonar Range</i> /Alcance Sonar Previsto
RL	<i>Reverberation Level</i> /Nível de Reverberação

ROC	<i>Receiver-Operating-Characteristics Curves</i> /Curvas Caraterísticas de Operação do Recetor
SA	Salinidade Absoluta
SE	<i>Signal excess</i> /Excesso de Sinal
SL	<i>Source Level</i> /Nível Sonoro da Fonte
SPL	<i>Sound Pressure Level</i> /Nível de Pressão Sonora
SSL	<i>Sea Surface Losses</i> /Perdas por Reflexões na Superfície do Mar
SN	<i>System Noise</i> /Nível de Ruído Próprio
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> /Relação Sinal-Ruído
SONAR	<i>Sound Navegation and Ranging</i> /Navegação e Determinação da Distância pelo Som
SS	<i>Sea State</i> /Estado do Mar
TEOS	<i>Thermodynamic Equation Of Seawater</i> /Equação Termodinâmica de Estado da Água do Mar
TL	<i>Transmission Loss</i> /Perdas de Transmissão
TS	<i>Target Strength</i> /Refletividade do Alvo ou Índice de Reflexão
WOA	<i>World Ocean Atlas</i> /Atlas do Oceano Mundial
WOD	<i>World Ocean Database</i> /Base de Dados do Oceano Mundial
XBT	<i>eXpendable Bathy Thermograph</i> /Batitermógrafo de consumo
XSV	<i>eXpendable Sound Velocimeter</i> /Velocímetro do som, de consumo

Índice de Figuras

Figura 1: Padrão omnidirecional de um único hidrofone, em que se convencionou que a origem dos eixos coordenados corresponde à localização do hidrofone e que r corresponde ao raio da esfera.....	15
Figura 2: <i>Array</i> cilíndrico, correspondente aos usados a bordo das unidades navais.....	17
Figura 3: Influência das diversas fontes de ruído no espectro de frequências.....	20
Figura 4: Influência dos vários componentes do navio para o ruído irradiado pelo mesmo, bem como sua localização.	21
Figura 5: Variedade de trajetos que o ruído gerado por uma plataforma pode percorrer até ser recebido pelo <i>array</i> de hidrofones: (1) transmitido pelo casco, (2) caminho direto da água (frequentemente o caso do ruído da hélice), (3) dispersões de volume e dispersão ou reflexão (4) contacto superfície inferior ou (5) contacto com o fundo do oceano.	23
Figura 6: Ruído próprio e sua dependência do espectro de frequências, para submarinos, torpedos e fragatas. Existe um decréscimo do seu valor para frequências mais elevadas, independentemente da plataforma que esteja a ser considerada.....	24
Figura 7: Reverberações resultantes da detonação de cargas explosivas a 800 pés, com um fundo de 6.500 pés de profundidade. As medições foram feitas por hidrofone situado a uma imersão de 135 pés.....	25
Figura 8: Representação do volume elementar (dV) e do ângulo sólido ($d\Omega$), usados para o cálculo da reverberação de volume.....	27
Figura 9: Área considerada para os cálculos da reverberação de superfície e fundo. Por convenção considera-se que o projetor está posicionado ao centro.	28
Figura 10: Causas de atenuação e absorção na água do mar.....	33
Figura 11: Representação do centro acústico do alvo tendo em conta as ondas incidentes e refletidas.	38
Figura 12: TS bi-estático.	39
Figura 13: Distribuição do TS em função da marcação relativa ao submarino, que segue um padrão tipo “borboleta”.	42

Figura 14: Curvas ROC para determinação do DT, tendo em conta a probabilidade de deteção e falso alarme, em gráfico de coordenadas de probabilidade, para os índices de deteção, d , indicados entre 0 e 36.....	46
Figura 15: Refração do raio sonoro numa fronteira plana, a separar dois meios com diferentes velocidades do som c_1 e c_2 respetivamente.	49
Figura 16: Arco de circunferência que une as diversas posições ocupadas pelo raio sonoro. O raio da circunferência mantém-se constante, devido à linearidade do gradiente vertical da velocidade do som.	50
Figura 17: Perfis de temperatura conservativa ($^{\circ}\text{C}$), salinidade absoluta (g/kg) e ainda o perfil calculado da velocidade do som (m/s) resultante dos valores de temperatura do perfil XBT da Figura 18 completados pelos perfis climatológicos da Figura 19.....	57
Figura 18: <i>Layout</i> da ferramenta operacional SeaRider para a seleção da fonte de dados pretendida pelo utilizador e tabelas XSV e XBT com valores prédefinidos de perfis de velocidade do som e de temperatura.....	58
Figura 19: Perfis climatológicos resultantes da aplicação da base de dados anual, com 1° de resolução espacial, para a posição latitude $35,0^{\circ}$ N e longitude $40,0^{\circ}$ W.	59
Figura 20: Mapa batimétrico do Atlântico Norte, obtido com recurso às bases de dados da GEBCO.....	60
Figura 21: Painel de introdução de dados para a resolução do transporte de coordenadas geodésicas.....	61
Figura 22: Perfil batimétrico obtido através da aplicação dos cálculos de geodesia no elipsoide do Manual de Hidrografia (J.A.B. Fernandes, 1967).....	63
Figura 23: Determinação dos trajetos percorridos por raios sonoros, utilizando o algoritmo de Val Schmidt.	64
Figura 24: Aplicação do teorema de Pitágoras para a determinação das distâncias, percorridas pelos diversos raios acústicos, entre pontos de controlo.	67
Figura 25: Ruído ambiente espectral, resultante da aplicação de interpolações e/ou extrapolações de valores conhecidos.	71

Figura 26: Funções resultantes da aplicação do método dos mínimos quadrados, recorrendo ao MATLAB para obtenção de resultados e apresentação dos mesmos.	74
Figura 27: Curva de ruído próprio, dependendo do estado do mar e da velocidade do navio, segundo Urick (1983), p. 374, para um “ <i>destroyer</i> moderno” (em 1983).....	79
Figura 28: Janela da ferramenta operacional SeaRider para a seleção do método de cálculo das perdas de transmissão.....	80
Figura 29: O afastamento vertical de dois raios e a respetiva abertura angular no transdutor $\Delta\theta$ permitem determinar, no alvo ou ponto de controlo da função <i>raytrace</i> , o valor das perdas de transmissão.....	80
Figura 30: Janela da ferramenta operacional SeaRider para a seleção fator <i>beta</i> (entre 1 e 2) da dispersão esférico-cilíndrica.	82
Figura 31: Valores de BS de superfície tendo em conta a velocidade do vento a 10 nós e a frequência de operação do sistema acústico. Considera-se o <i>grazing angle</i> normal à superfície.	85
Figura 32: Medições efetuadas no Reino Unido, nas designadas <i>shallow waters</i> , com os tipos de fundo mais comuns (lodo, areia e rocha) e os seus níveis <i>backscattering strength</i>	87
Figura 33: Função <i>raytracing</i> e respetivos alcances sonar resultantes da aplicação da base de dados anual, com 1° de resolução espacial, para a posição 36,9° N e 39,9° W, para um azimute de 090° e distância de 30 km, com o sonar a operar em modo ativo.	89
Figura 34: Gráfico de excesso de sinal e respetivos alcances sonar resultantes da aplicação da base de dados anual, com 1° de resolução espacial, para a posição 36,9° N e 39,9° W, para um azimute de 090° e distância de 30 km, com o sonar a operar em modo ativo.....	90
Figura 35: Gráfico da função <i>raytracing</i> e respetivos alcances sonar resultantes da aplicação da base de dados anual, com 1° de resolução espacial, para a posição 36,9° N e 39,9° W, para um azimute de 090° e distância de 68 km, com o sonar a operar em modo passivo. ..	90
Figura 36: Gráfico de excesso de sinal e respetivos alcances sonar resultantes da aplicação da base de dados anual, com 1° de resolução espacial, para a posição 36,9° N e 39,9° W, para um azimute de 090° e distância de 68 km, com o sonar a operar em modo passivo. ..	90
Figura 37: Perfil de temperaturas resultante do ficheiro BT, obtido a bordo do NRP "Francisco de Almeida" durante o exercício multinacional SWORDFISH 18, pelas 12h30	

de 22 de junho de 2018. Estando representado com asteriscos os pontos selecionados pelo supervisor sonar, e com círculos os resultantes de aplicação de um processo de interpolação.....	93
Figura 38: Perfil de temperatura, salinidade e velocidade do som resultante do ficheiro BT, obtido a bordo do NRP "Francisco de Almeida" durante o exercício multinacional SWORDFISH 18, às 12h30 de 22 de junho de 2018, tendo sido completados com a climatologia até à profundidade dessa posição geográfica.	94
Figura 39: Perfil de temperaturas resultante do ficheiro do CTD, obtido a bordo do NRP "Zarco" durante o embarque de fim de semana da Escola Naval, na baía de Cascais, pelas 09h59 (A) de 27 de abril de 2019.....	95
Figura 40: Seleção da base de dados climatológicos para a obtenção dos perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som, para a posição geográfica selecionada pelo operador da ferramenta operacional.	95
Figura 41: Perfis obtidos das bases de dados climatológicos da WOD18 anual, com a resolução de 1°, na posição geográfica 36,9° N e 39,9° W.	96
Figura 42: Perfis obtidos das bases de dados climatológicas da WOD18 de verão, com a resolução de 1°, na posição geográfica 36,90 N e 39,90 W.....	97
Figura 43: Perfis obtidos das bases de dados climatológicas da WOD18 de junho, com a resolução de 1°, na posição geográfica 36,9° N e 39,9° W.	97
Figura 44: Seleção do método de cálculo das perdas de transmissão, para a realização da previsão sonar e respetiva análise.	100
Figura 45: Previsão sonar e alcance de deteção, utilizando a separação vertical de raios para a determinação das perdas por transmissão.	100
Figura 46: Previsão sonar e alcance de deteção, utilizando a propagação esférico-cilíndrica, com $\beta = 1,65$ para a determinação das perdas por transmissão.....	101
Figura 47: Previsão sonar e alcance de deteção, utilizando a propagação esférico-cilíndrica, com $\beta = 1,65$, com o sonar a operar em modo passivo.....	102
Figura 48: Perfil batimétrico para a posição geográfica 39,8° N e 009,5° W, azimute de 090° e para uma distância de 50 milhas náuticas. Para garantir a mesma escala horizontal, todos os gráficos apresentam o perfil batimétrico para 50 milhas náuticas.	106

Figura 49: Perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som para a posição geográfica 39,8 ⁰ N e 009,5 ⁰ W.....	107
Figura 50: Função <i>raytrace</i> e de excesso de sinal, bem como o valor da distância de detecção para a posição geográfica 39,8 ⁰ N e 009,5 ⁰ W.....	108
Figura 51: Perfil batimétrico para a posição geográfica 10,0 ⁰ N e 023,5 ⁰ W, azimuth de 090 ⁰ e para uma distância de 50 milhas náuticas.	108
Figura 52: Perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som para a posição geográfica 10,0 ⁰ N e 023,5 ⁰ W.....	109
Figura 53: Função <i>raytrace</i> e de excesso de sinal, bem como o valor da distância de detecção para a posição geográfica 10,0 ⁰ N e 023,5 ⁰ W.....	110
Figura 54: Perfil batimétrico para a posição geográfica 36,9 ⁰ N e 011,9 ⁰ W, azimuth de 090 ⁰ e para uma distância de 50 milhas náuticas.	110
Figura 55: Perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som para a posição geográfica 36,9 ⁰ N e 011,9 ⁰ W.....	111
Figura 56: Função <i>raytrace</i> e de excesso de sinal, bem como o valor da distância de detecção para a posição geográfica 36,9 ⁰ N e 011,9 ⁰ W.....	112
Figura 57: Perfil batimétrico para a posição geográfica 36,9 ⁰ N e 024,8 ⁰ W, azimuth de 270 ⁰ e para uma distância de 50 milhas náuticas.	112
Figura 58:Perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som para a posição geográfica 36,9 ⁰ N e 024,8 ⁰ W.....	113
Figura 59: Função <i>raytrace</i> e de excesso de sinal, bem como o valor da distância de detecção para a posição geográfica de 36,9 ⁰ N e 024,8 ⁰ W.	114
Figura 60: Menu do <i>Raypath</i> relativo à entrada dos parâmetros para a função <i>raytracing</i>	116
Figura 61: Gráfico do traçado de raios sonoros no <i>Raypath</i> , sendo este bidimensional visto que apenas considera a distância horizontal ao transdutor e a imersão.....	117
Figura 62: Submenu <i>Prediction Parameters</i> , onde são introduzidos os diversos parâmetros das equações sonar.....	117
Figura 63: Submenu sonar <i>Array Options</i> , com a possibilidade de inserir apenas um hidrofone omnidirecional ou um <i>array</i> de hidrofones.	118

Figura 64: Submenu <i>Decimate Profile Options</i> , permite alterar os pontos intermédios do perfil de temperatura e a regra de interpolação pretendida.....	118
Figura 65: Gráfico de excesso de sinal, sendo o gradiente de cores correspondente a alterações de 15 dB. Este gráfico permite determinar o alcance sonar.....	119
Figura 66: Menu “Geografia e ambiente” do FAPSO dedicado à introdução da posição geográfica e das condições meteorológicas e/ou oceanográficas.....	122
Figura 67: Menu “Parâmetros do sonar” do FAPSO para a introdução das características técnicas dos equipamentos acústicos utilizados e o seu modo de funcionamento.	122
Figura 68: Gráfico de traçado de raios sonoros no FAPSO, sendo este bidimensional visto que apenas considera a distância horizontal ao transdutor e a imersão.....	123
Figura 69: Menu “Resultados” do FAPSO para a apresentação dos perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som e o gráfico da função <i>raytrace</i>	123
Figura 70: Gráfico de excesso de sinal, sendo o gradiente de cores correspondente a uma diminuição de 15 dB. Este gráfico permite determinar a posição mais provável do submarino.....	124

Índice de Tabelas

Tabela 1: Definição dos parâmetros sonares, correspondendo a intensidade de referência a uma onda plana de 1 μPa .	9
Tabela 2: Valores de TS estimados para formas geométricas simples, as quais depois podem ser utilizadas para prever valores para minas, torpedos e submarinos.	41
Tabela 3: Matriz de decisão binária para a decisão da presença, ou não, de um contacto sonar num meio dominado pelo ruído.	45
Tabela 4: Valores de referência para as perdas por espalhamento dependendo do tipo de fundo.	68
Tabela 5: Estados do mar (escala da Organização Meteorológica Mundial) e correspondentes alturas de vaga e velocidades do vento, utilizadas para o cálculo das perdas de superfície por espalhamento.	69
Tabela 6: Massas de água à escala global, tendo em conta a profundidade das mesmas, oceano em que se localizam e respetivas gamas de temperaturas e de salinidades.	76
Tabela 7: Condições iniciais para o cálculo do coeficiente de absorção para as diversas massas de água.	76
Tabela 8: Resultados da aplicação das diversas fórmulas às massas de água existentes, com a aplicação das condições iniciais definidas na Tabela 7.	77
Tabela 9: BS associado a cada tipo de fundo, para o cálculo das reverberações de fundo. Fonte: Waite (2002) p. 115.	86
Tabela 10: Parâmetros de entrada no SeaRider para análise dos resultados dos métodos para o cálculo das perdas de transmissão.	99
Tabela 11: Influência que dos diversos parâmetros das equações do excesso de sinal têm sobre os alcances de deteção e contra deteção, com aumentos dos parâmetros.	104
Tabela 12: Posições geográficas utilizadas para as corridas teste e seu interesse no âmbito da previsão sonar.	105
Tabela 13: Posições geográficas de teste e seus respetivos rumos, para comparação dos resultados da previsão sonar.	126

Tabela 14: Alcances de deteção e contra deteção, para comparação das três ferramentas operacionais analisadas nesta dissertação de mestrado. Valores em metros.	127
--	-----

Introdução

Enquadramento Geral

A maioria dos atuais sistemas de comunicação e transmissão utilizam a propagação de ondas eletromagnéticas, sendo estas uma importante ferramenta para conhecer o nosso meio ambiente. Para a navegação, operações aéreas e de superfície são utilizados radares cujo funcionamento se baseia na emissão deste tipo de ondas.

Contudo, a sua utilização no ambiente submarino é bastante limitada, tal deve-se à elevada condutividade da água do mar que provoca uma elevada atenuação destas ondas. Assim, foi necessário explorar a propagação das ondas sonoras, muito menos atenuadas e que apresentam características relevantes que tornam essencial a sua utilização. Tratam-se simplesmente de vibrações mecânicas das partículas do meio em torno da sua posição média de equilíbrio. Contudo, os sinais acústicos são perturbados devido à não homogeneidade do meio, que contribui para a existência de ruído e ecos parasitas que necessitam de ser estudados, para além da ocorrência de reflexões e de reverberações.

A nível operacional, as ondas sonoras podem ser empregues para a deteção de alvos e/ou obstáculos (dos quais podemos referir os submarinos, os torpedos e as minas) e determinação das suas características. A nível científico, permitem conhecer o fundo submarino e a transmissão de sinais.

Assim, o estudo e modelação da acústica submarina é um processo bastante complexo, sendo que apenas pode ser alcançada uma aproximação, visto que é impossível conseguir prever todos os processos que podem ocorrer com total precisão. Todavia, diversos modelos têm sido desenvolvidos, sendo assentes em diversas teorias e pressupostos.

Devido à elevada superioridade tática que os submarinos detêm, é relevante o desenvolvimento de ferramentas operacionais de previsão sonar, que permitam aos navios conhecer a probabilidade e distância de deteção destes oponentes, através do melhor conhecimento das condições de propagação, de modo a seleccionar a melhor opção tática de manobra, de disposição dos meios navais e de operação dos sensores.

A propagação dos raios sonoros depende de um elevado número de fatores, sendo de salientar as condições oceanográficas e físicas da água do mar na área de operações, as

características técnicas dos equipamentos acústicos, as variações sazonais, natureza do fundo e o ruído ambiente.

Assim, para a determinação do trajeto dos raios sonoros é utilizada a função *raytrace*, a qual simplifica o seu estudo ao não considerar o feixe, mas sim cada um dos raios individualmente. Apesar de esta função resolver o fenómeno refrativo dos raios, não considera outros fenómenos acústicos característicos do ambiente submarino.

Para tal, é necessário recorrer às equações sonar, desenvolvidas durante a 2ª Guerra Mundial, onde o emprego da arma submarina foi relevante. Estas equações permitem avaliar os equipamentos acústicos das diversas plataformas, com a determinação dos alcances de deteção e contra deteção. Assim, fenómenos como as perdas de transmissão, absorção, atenuação, reflexão, reverberações e ruído são considerados, permitindo a obtenção de resultados mais realistas e eficientes.

Âmbito, Objetivos e Metodologia da Dissertação

Esta dissertação de mestrado insere-se na área da acústica submarina, sendo que no programa académico da Escola Naval é estudada nas unidades curriculares de Oceanografia I (Descritiva) e II (Dinâmica) e na de Acústica, Sonar e Armas Submarinas. Contudo, para a realização de toda a ferramenta operacional foram essenciais as bases adquiridas nas unidades curriculares de Análise Matemática (I, II e III), Álgebra, Hidrografia e Programação, onde a linguagem de programação lecionada corresponde à utilizada para o desenvolvimento do SeaRider.

O trabalho partiu de objetivos pré-estabelecidos aquando do plano de dissertação, que se materializaram numa questão central:

QC: Como obter uma previsão sonar a partir das equações sonar, conhecendo as características técnicas do equipamento acústico, através da construção de uma ferramenta computacional, em linguagem MATLAB, que corresponda às necessidades da comunidade operacional?

Partindo desta questão central e, tendo em conta a complexidade que esta representa, surgiram as demais questões derivadas que permitem responder à questão anterior:

QD1: Como devem ser modelados os diversos parâmetros das equações sonar?

QD2: Qual a base de dados a utilizar para obter os perfis de temperatura e salinidade? E para a obtenção do perfil batimétrico do fundo do mar?

Pretende-se assim, o desenvolvimento de um modelo de propagação acústica, que seja testado a bordo dos navios da Marinha Portuguesa, e que seja posteriormente validado e empregue na mesma.

Para o desenvolvimento deste modelo existiram três fases distintas, que permitiram a obtenção do *software* final. A primeira foi uma análise da bibliografia já existente e confronto entre modelos já desenvolvidos (na comunidade científica conhecida por estado da arte), procurando-se a determinação de fragilidades e métodos para a sua resolução, tendo sido realizado o estudo dos diversos parâmetros essenciais para a resolução das equações sonar.

A segunda fase foi o desenvolvimento propriamente dito do SeaRider, com a resolução dos perfis de informação oceanográfica, modelação dos diversos parâmetros considerados e obtenção da previsão sonar. A terceira incluiu os diversos testes feitos a bordo de unidades navais, e comparação com ferramentas semelhantes já existentes para o efeito, e sua análise pela comunidade operacional responsável por esta área. Esta fase foi sobretudo conseguida durante o exercício nacional CTPH19, com a colaboração do NRP “Álvares Cabral”.

Pertinência do Tema

Foi durante a 2ª Guerra Mundial que a arma submarina assumiu uma elevada relevância. De facto o elevado número de navios afundados por submarinos alemães na conhecida Batalha do Atlântico, quase ameaçou a vitória dos Aliados.

A elevada vantagem tática que os submarinos possuem, resultante da dificuldade que os navios de superfície detêm na sua deteção é amplamente conhecida, daí a necessidade de arranjar ferramentas que permitam retirar o maior desempenho dos equipamentos acústicos de bordo, sobretudo devido ao elevado desenvolvimento tecnológico que estas plataformas têm sofrido nos últimos anos. É, assim, necessário que as ferramentas operacionais acompanhem a evolução destes submarinos, que cada vez mais produzem menos ruído e cujo desenho visa que as reflexões não sejam detetadas pelo equipamento acústico que emitiu o sinal inicial.

A Marinha Portuguesa possui, nos nossos dias, cinco fragatas com capacidade ASW (*Anti-Submarine Warfare*) pertencentes a duas classes distintas, que também possuem equipamentos acústicos com características técnicas diferentes. A classe “Vasco da Gama”

é equipada de origem com o sonar de casco AN-SQS 510, sendo atualmente ainda utilizado este equipamento. A classe “Bartolomeu Dias” está equipada com o sonar PHS-36. Para além destes sonares, estas podem ser equipados com o helicóptero Westland Lynx MK95, sendo este também dotado de um equipamento acústico, o sonar de imersão variável AN-AQS 18V.

Apesar dos equipamentos acústicos existentes, as atuais fragatas são pouco eficientes na guerra ASW. Isto deve-se à falta de modernização dos sonares existentes a bordo, que não acompanharam a evolução tecnológica das plataformas submarinas, do que resulta terem uma capacidade de deteção bastante reduzida.

O programa de previsão sonar atualmente utilizado a bordo, *Raypath*, é também bastante antigo, datando da década de 80, e pouco se conhece sobre o método como resolve a modelação da acústica submarina, pelo que o seu uso atualmente pode ser questionável. O código de programação desse *software* não é aberto, ou seja, não nos permite melhorá-lo.

É neste âmbito que surge a necessidade da criação de uma nova ferramenta operacional, que já considere os avanços científicos das últimas décadas e cujo método seja conhecido e validado. O desenvolvimento de uma ferramenta nacional possui a vantagem de o método de resolução da modelação da acústica submarina ser conhecido, e poderem ser realizadas modificações que acompanhem os desenvolvimentos tecnológicos e estudos realizados na área.

Estrutura da Dissertação

Decorrente do processo de investigação e construção da ferramenta operacional, houve a necessidade de efetuar alterações à proposta de estrutura inicialmente apresentada aquando do plano de dissertação. A complexidade do desenvolvimento de um método de modelação da acústica submarina, e seus testes e validação exigiu a existência de mais capítulos que contemplassem estas fases do trabalho.

A dissertação encontra-se organizada por capítulos, seguindo a ordem de realização do SeaRider, o que permite ao leitor seguir uma ordem lógica, acompanhando a evolução e desenvolvimento do trabalho.

Inicialmente é apresentada uma introdução ao tema, onde é explicado em que consiste a modelação acústica, em que âmbito é desenvolvido o projeto, quais os objetivos propostos, metodologia utilizada (na qual são definidas a questão central e as questões derivadas), pertinência (consiste na explicação do motivo pelo qual foi desenvolvido o trabalho) e estrutura adotada.

O Capítulo 1 contém o enquadramento teórico, no qual são explicados todos os parâmetros das equações sonar (trabalhando nos modos ativo e passivo) usados no desenvolvimento da dissertação, assim como a função *raytrace* utilizada para conhecer o traçado dos raios sonoros. As explicações apresentadas são baseadas em bibliografia já existente, sendo sempre citadas as fontes utilizadas.

O segundo capítulo divide-se nas diversas fases de desenvolvimento do SeaRider, sendo explicado o método para resolver as diversas dificuldades encontradas, sendo ainda referidas as bases de dados batimétricas e oceanográficas empregues para os perfis necessários na modelação acústica.

No Capítulo 3 são apresentados os testes realizados em diversas posições geográficas, bem como a influência dos diversos parâmetros nos alcances de deteção e contra deteção, tendo como objetivo conhecer possíveis fragilidades desta ferramenta operacional.

No quarto e último capítulo são discutidos os resultados obtidos entre os diversos *softwares* disponíveis, nomeadamente o FAPSO, *Raypath* e o SeaRider, sendo retiradas conclusões sobre uma possível utilização a bordo do último programa.

Finalmente, será respondida a questão central desta dissertação, assim como as duas perguntas derivadas que levaram ao desenvolvimento desta dissertação de mestrado, sendo ainda introduzidos em Apêndice A o resumo alargado do trabalho, um manual de utilizador do *SeaRider* em Apêndice B, em Apêndice C os resultados obtidos a bordo do NRP “Álvares Cabral” durante o exercício CTPH19, e ainda artigos publicados e/ou apresentados em conferências desta área (Apêndices D e E), o Apêndice F corresponde ao código do programa.

Capítulo 1. Enquadramento Teórico

1.1. Introdução à Acústica Submarina

As ondas sonoras correspondem a ondas mecânicas longitudinais, cuja propagação resulta de compressões e rarefações sucessivas das partículas do meio, havendo transporte de energia cinética e potencial, mas não de matéria (ou seja, as partículas apenas oscilam em torno da sua posição de equilíbrio). Assim, as ondas acústicas apenas se propagam num meio material, ao contrário das ondas eletromagnéticas que também se propagam no vazio. Designam-se como longitudinais porque a direção de propagação é a mesma que a da vibração.

A elevada complexidade da transmissão de sinais na água, constitui um dos grandes desafios da modelação da acústica submarina, dependendo esta de um conjunto de processos, dos quais se destacam as reflexões nas fronteiras (superfície e fundo), reverberações (partículas, bolhas de ar, seres vivos, entre outros), atenuação em zonas de divergência e amplificação em zonas de convergência.

Os sonares são sistemas que visam a deteção, localização e identificação de alvos, tendo dois princípios de funcionamento distintos: ativo (emitem um sinal sonoro e fazem o processamento do eco proveniente do alvo) e passivo (apenas processam os sinais acústicos intercetados; permite uma vantagem tática relevante, visto que o sonar não emite sinais acústicos). De referir que usualmente os navios de superfície costumam operar o sonar em modo ativo, ao contrário do que acontece com os submarinos. As aplicações para estes sistemas, a nível militar, surgem no âmbito da guerra submarina e de minas.

1.2. Equações Sonar

Tendo como objetivo a previsão sonar, estas equações relacionam um conjunto de parâmetros que representam os diversos fenómenos a que é sujeito o sinal sonoro, desde que é emitido até ser detetado pelo sistema acústico que processa o sinal. Estas equações tornam-se relevantes pela relação logarítmica estabelecida entre esses parâmetros, sendo os cálculos reduzidos a simples adições e subtrações.

Contudo, as equações sonar são apenas uma representação aproximada da realidade do ambiente submarino, visto que o oceano apresenta uma variabilidade temporal e

geográfica bastante elevada, devido aos processos físicos e químicos que ocorrem no seu seio não terem sempre a mesma expressão.

Os termos das equações dependem do sistema acústico, do meio de propagação e do alvo que se pretende detetar, relativos a uma onda plana de referência cuja intensidade corresponde a $1 \mu\text{Pa}$ (Urick, 1983, p. 19), sendo a unidade dos níveis sonoros o dB. Assim, depende do sonar: o nível sonoro do projetor (SL), nível de ruído próprio (SN), índice de diretividade (DI) e o limiar de deteção (DT); do meio depende: as perdas de transmissão (TL), o nível de reverberação (RL) e o ruído total (NL), que inclui o ruído próprio (SN) e o ruído ambiente (ANL); finalmente do alvo depende a refletividade do alvo (TS) e o nível sonoro (SL, sendo que este apenas se aplica no sonar passivo, em que este parâmetro representa o nível sonoro do alvo que se pretende detetar). As siglas indicadas correspondem à nomenclatura empregue pela comunidade acústica. Na **Tabela 1** estão representados estes parâmetros da equação sonar.

Símbolo do parâmetro		Referência	Definição
<i>Source Level</i>	SL	1 m da fonte no seu eixo acústico	$10 \log \frac{\text{intensidade da fonte a 1 m}}{\text{intensidade de referência}}$
<i>Transmission Loss</i>	TL	1 m da fonte e no alvo ou receptor	$10 \log \frac{\text{intensidade do sinal a 1m da fonte}}{\text{intensidade do sinal no alvo}}$
<i>Target Strength</i>	TS	1 m do centro acústico do alvo	$10 \log \frac{\text{intensidade do eco a 1m do alvo}}{\text{intensidade do sinal incidente}}$
<i>Noise Level</i>	NL	Na localização do hidrofone	$10 \log \frac{\text{intensidade do ruído}}{\text{intensidade de referência}}$
<i>Receiving Directivity Index</i>	DI	Nos terminais do hidrofone	$10 \log \frac{\text{ruído recebido por hidrofone omnidireccional equivalente}}{\text{ruído recebido pelo hidrofone}}$
<i>Reverberation Level</i>	RL	Nos terminais do hidrofone	$10 \log \frac{\text{potência da reverberação nos terminais do hidrofone}}{\text{potência relativa à intensidade de referência}}$
<i>Detection Threshold</i>	DT	Nos terminais do hidrofone	$10 \log \frac{\text{potência do sinal para permitir deteção}}{\text{potência do ruído nos terminais do hidrofone}}$

Tabela 1: Definição dos parâmetros sonares, correspondendo a intensidade de referência a uma onda plana de $1 \mu\text{Pa}$ ¹.

1.2.1. Equação do Sonar Ativo

No sonar ativo, o sinal emitido propaga-se no meio até ser refletido de volta pelo alvo, o que explica a dupla distância que este sinal percorre e que as perdas de transmissão nesta equação sejam multiplicadas por dois. Contudo, existem elementos adicionais no meio que também contribuem para o fenómeno de reflexão aleatória (dispersão ou

¹ Adaptado da tabela 2.1, p. 21 de Hodges (2010).

² Na fórmula para o cálculo da intensidade acústica do sinal emitido, p_r representa o valor eficaz de pressão;

scattering) de retorno, num processo que se designa de reverberação (de superfície, de fundo e de volume). A detecção também vai depender do nível de emissão e do índice de refletividade do alvo. Assim, as equações correspondentes são apresentadas de seguida, dependendo se estas são limitadas pelo ruído ou pelas reverberações.

$$SE = SL - 2TL + TS - NL + DI - DT \quad (\text{se dominado pelo ruído})$$

$$SE = SL - 2TL + TS - RL + DI - DT \quad (\text{se dominado pela reverberação})$$

1.2.2. Equação do Sonar Passivo

A equação do sonar passivo é mais simples que a anterior, visto que o receptor apenas processa os sinais emitidos pelos alvos, procurando determinar a sua localização e se possível identificá-los sem, no entanto, denunciar a sua presença através de emissão de um sinal acústico. Assim, o nível de intensidade passa a depender do alvo, deixando-se de considerar o índice de refletividade do mesmo. As perdas de transmissão e o ruído ambiente continuam a depender do meio, porém a sua influência é menor, visto que o sinal passa apenas a realizar um trajeto. No contexto da detecção de sonar passivo não se verifica reverberação, pois o detetor não emite. Assim, a equação correspondente é apresentada de seguida.

$$SE = SL - TL - NL + DI - DT$$

1.2.3. Excesso de Sinal

Para se obter um determinado nível de desempenho, existe uma relação sinal-ruído mínima estabelecida, sendo que o excesso de sinal corresponde ao valor que se tem relativamente a essa condição.

No caso da detecção, esse valor mínimo designa-se por limiar de detecção (DT, sigla em inglês para *detection threshold*), que corresponde à relação sinal-ruído requerida para uma probabilidade de detecção de 50%, num determinado período de propagação, sendo conhecida a possibilidade de ocorrerem falsos alarmes. Para que exista excesso de sinal é necessário que sejam cumpridas as seguintes condições.

$$SL - 2TL + TS - NL + DI - DT > 0 \quad (\text{se sonar ativo})$$

$$SL - TL - NL + DI - DT > 0 \quad (\text{se sonar passivo})$$

1.2.4. Figura de Mérito

A figura de mérito (FOM, sigla em inglês para *Figure of Merit*) corresponde à perda de transmissão que resultará em um excesso de sinal de zero dB, para uma probabilidade de detecção de 50%. É frequentemente utilizada para definir o desempenho de um sonar e a máxima distância de detecção.

A FOM resulta da combinação termos das equações sonar relativos ao equipamento e ao alvo. Contudo, no caso do sonar ativo, quando o ruído ambiente é dominado pela reverberação, a FOM_{ati} não é constante e varia com a distância e deixa de ser indicação útil quanto ao desempenho do sonar (Urick, 1983, p. 22).

$$FOM = SL - (NL - DI + DT)$$

1.3. Nível de Intensidade Espectral e Nível de Banda

A intensidade acústica (I) corresponde ao fluxo médio de energia acústica, por unidade de tempo, que atravessa uma unidade de área normal à direção de propagação. O que permite distinguir os diversos sons que nos rodeiam é a diferente expressão da sua intensidade ao longo do espectro de frequências.

O nível de intensidade espectral, no âmbito da acústica, define-se como a distribuição da intensidade para uma largura de banda de 1 Hz, ou seja, $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ (Varela, 2001, p. 2.17). Visto que a intensidade acústica não é repartida uniformemente ao longo da frequência, surge a densidade espectral (ISL), que vai relacionar estas duas variáveis. Para a calcular usa-se a seguinte fórmula.

$$ISL = 10 \log \frac{\alpha l \times 1 \text{ Hz}}{I_{ref}}$$

Torna-se assim possível relacionar a variação de intensidade por variação da gama de frequências, sendo que $I_{ref} = 6,67 \times 10^{-19} \frac{W}{m^2}$ (Varela, 2001, p. 2.17), e αl é a densidade espectral de intensidade ($\alpha l = \frac{I}{\Delta f}$).

Contudo, nem sempre a análise que queremos efetuar do espectro de intensidade tem uma largura de banda de 1 Hz, assim para valores diferentes deste utiliza-se o nível de banda (IL), que corresponde a:

$$IL = 10 \log \frac{\alpha l \times 1 \text{ Hz}}{I_{ref}} + 10 \log \frac{W}{1 \text{ Hz}}$$

Em que W corresponde à largura de banda considerada. Se a banda for reduzida (relativamente estreita ou pouco larga) é possível simplificar o cálculo anterior, ficando:

$$IL = ISL + 10 \log W$$

O nível de banda é sobretudo utilizado para fontes de ruído, mas tem a limitação de a banda considerada ser obrigatoriamente a mesma para todas as fontes que estejam a ser consideradas, ou seja o W deve ser o mesmo para todas as fontes.

1.4. Nível de Intensidade

Este parâmetro das equações sonar define-se como a intensidade do sinal emitido, relativo a uma onda plana com pressão de referência de 1 μPa , medido a um metro ou uma jarda (dependendo da unidade de medida que esteja a ser considerada, desde que seja a mesma para todos os cálculos), tendo em conta o centro do feixe do projetor, visto que na sua generalidade são direcionais e que a referência para a medição do nível de emissão sonora corresponde ao eixo do projetor (Urick, 1983, p. 71).

O cálculo da intensidade do sinal é efetuado através da seguinte expressão².

$$I_r = \frac{p_r^2}{\rho c}$$

Na qual ρ representa a densidade da água, c a velocidade do som no meio considerado e p_r o valor eficaz de pressão acústica (Urick, 1983, p. 73). Sabendo o valor da intensidade é possível calcular o nível sonoro, aplicando a expressão seguinte.

$$SL = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB}$$

O SL, nível sonoro ou nível de intensidade, representa a relação entre a intensidade da fonte sonora omnidirecional considerada e a intensidade de referência³ (Hodges, 2010, p. 63).

² Na fórmula para o cálculo da intensidade acústica do sinal emitido, p_r representa o valor eficaz de pressão; em inglês designa-se por *rms* (*root mean square*); $p_r = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}}$

Quando são definidas as características dos projetores, considera-se que a sua potência acústica é omnidirecional, assim a área intersectada pela onda sonora originada corresponde à área de uma esfera, sendo igual a $4\pi r^2$, em que r é a distância ao centro acústico da fonte sonora, ou por outras palavras, o raio da esfera. Usando a distância de referência, $r = 1 \text{ m}$, resulta a fórmula seguinte.

$$SL = 10 \log \frac{P/4\pi}{6,67 \times 10^{-19}} = 10 \log P + 170,8 \text{ dB}^4$$

Contudo, os projetores, na sua generalidade, não são omnidirecionais, possuindo uma diretividade de transmissão (*transmission directivity index* ou DI_T), o que leva a um aumento do nível de intensidade na direção do feixe do projetor. O valor deste corresponde à expressão⁵ seguinte.

$$DI_T = 10 \log \frac{4\pi}{\Omega_T} \text{ dB}$$

Sendo Ω_T o chamado ângulo sólido sonorizado, tendo como referência a componente omnidirecional (Hodges, 2010, p. 64). Assim, para um projetor que seja dotado de uma direção de transmissão, o SL resultante dependerá da potência de emissão e do DI do transdutor.

$$SL = 10 \log P + 170,8 + DI_T \text{ dB}$$

Contudo, existem limitações nas potências que podem ser empregues. A utilização de potências muito elevadas contribui para um aumento da pressão acústica junto ao transdutor, podendo originar o fenómeno designado por cavitação.

Torna-se assim relevante conhecer a potência e intensidade correspondentes ao limiar de cavitação, estando estas dependentes da profundidade (z), da duração do impulso (τ) e da frequência (f) (Hodges, 2010, p. 66).

$$I_{limiar} = 4000 \left(1 + \frac{z}{33}\right)^2 (1 + 0,15f + 0,000107^{2,4})^2 \left(1 + \frac{1}{\tau}\right) \text{ W/m}^2$$

³ A intensidade de referência, em acústica submarina, ou I_0 corresponde a $6,67 \times 10^{-19} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

⁴ Fonte: Hodges, 2010, p. 63.

⁵ Fonte: Hodges, 2010, p. 63.

$$P_{limiar} = 10 \log \frac{I_{limiar}}{I_0} \text{ dB}$$

1.5. Índice de Diretividade

O nível de intensidade tem associado um índice de diretividade de transmissão, que reduz a área intersectada pela onda sonora e consequentemente diminui perdas desnecessárias de potência, sendo a emissão efetuada num determinado feixe estabelecido pelo utilizador, apresentando vantagens significativas relativamente a uma emissão omnidirecional.

Os receptores são também dotados de um índice de diretividade. Quando empregues no sentido de processar sinais, resultantes do eco do sinal inicialmente emitido pelo próprio projetor e depois refletido num alvo ou provenientes de fontes externas à própria plataforma, pretende-se obter a direção e distância a que se encontra o alvo.

A sua eficácia depende diretamente da relação sinal-ruído (SNR na sigla em inglês). Quanto mais elevada for essa relação mais eficaz será o hidrofone, visto que o sinal útil tem que ser detetado num meio ruidoso. Esta relação pode ser calculada através da seguinte expressão⁶.

$$SNR = 10 \log \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \text{ dB}$$

Contudo, a existência de um único hidrofone, que na realidade corresponde a um receptor omnidirecional, não permite saber a direção ou azimuth da fonte de emissão acústica. Na **Figura 1** é apresentando o padrão omnidirecional que caracteriza a existência de um único hidrofone.

⁶ Fonte: Hodges, 2010, p. 63.

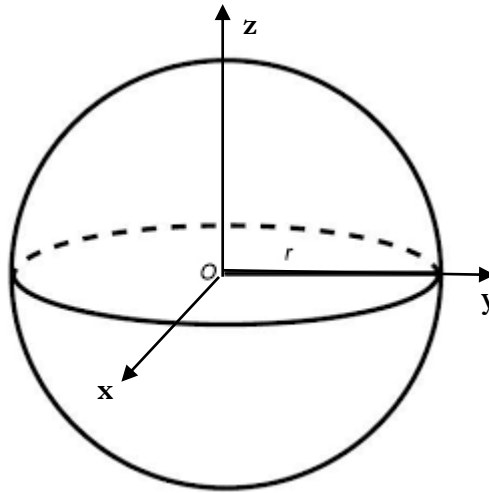


Figura 1: Padrão omnidirecional de um único hidrofone, em que se convencionou que a origem dos eixos coordenados corresponde à localização do hidrofone e que r corresponde ao raio da esfera.

O cálculo da potência para um único hidrofone depende da intensidade do ruído medida pelo hidrofone (I_i) e da distância entre o hidrofone e a posição em que se realiza a medição, tal como demonstrado de seguida.

$$P_{\text{ruído}} = 4\pi r^2 I_i$$

De modo a permitir a determinação da direção da emissão acústica, utiliza-se um conjunto de hidrofones colocados em *arrays*, melhorando a resposta dos mesmos na direção desejada, através da redução da potência do ruído e consequentemente do aumento da relação sinal-ruído. Para estas estruturas a potência é calculada através da expressão⁷ seguinte.

$$P_{\text{ruído}} = 4\pi I_i r^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} b(\theta) \cos\theta d\theta$$

Em que área atravessada pela onda acústica é definida pela fórmula apresentada⁸.

$$dA = r^2 \cos\theta d\theta d\phi$$

O padrão da intensidade direcional dos hidrofones, é definido em coordenadas polares de ângulos horizontais e verticais, por $b(\theta, \phi)$.

⁷ Fonte: Tucholski (2006), p. 14.1.

⁸ Fonte: Tucholski (2006), p. 14.1.

Assim o principal objetivo do índice de diretividade é melhorar a relação sinal-ruído, sendo tal conseguido através do feixe receptor do *array* de hidrofones, diminuindo a área intersectada pelo mesmo. Para as equações sonar este é calculado em dB, através da relação do ruído de um receptor omnidirecional, como o apresentado anteriormente, e o ruído do *array*.

$$DI = 10 \log \frac{NL_{omni}}{NL_{array}} = 10 \log \frac{1}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} b(\theta) \cos \theta d\theta} \quad ^9$$

Assim, o cálculo do índice de diretividade implica conhecer o padrão do feixe que otimiza a utilização do *array* de hidrofones. Este depende de um conjunto de variáveis, nomeadamente da distância (d) entre os vários hidrofones utilizados na receção, do ângulo vertical (θ) e do comprimento de onda (λ), devendo este corresponder à frequência intermédia da banda que está a ser utilizada (Tucholski, 2006, p. 14.1).

$$b(\theta) = \left[\cos^2 \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) \right]$$

1.5.1. Índice de Diretividade dos Sonares Usados a Bordo

Com o aumento do emprego da arma submarina e com a evolução tecnológica das últimas décadas, os submarinos são plataformas silenciosas e difíceis de detetar. Para aumentar a capacidade de deteção, os atuais sonares são dotados de uma elevada quantidade de hidrofones, para permitir uma melhor precisão na determinação da distância e do azimute. Na maioria dos navios, os hidrofones são colocados numa estrutura cilíndrica, devendo desta forma os cálculos mencionados no subcapítulo anterior ser adaptados, para melhor representarem a realidade encontrada.

Assim, o cálculo do índice de diretividade apenas depende da altura (h) e do diâmetro (d) do cilindro, e da frequência em kHz de operação do sonar (Waite, 2002, pp. 34-35).

$$DI = 10 \log(5 h d f_0^2)$$

Nestas estruturas cilíndricas, os hidrofones são colocados em várias linhas verticais, as chamadas *staves*, estando o seu número dependente da abertura angular do feixe. As *staves*

⁹ Fonte: Tucholski (2006), p. 14.3.

são sempre aos pares, de modo a permitir que os feixes sejam todos idênticos e forneçam uma cobertura de 360° (Waite, 2002, pp. 34-35). A largura do feixe horizontal é constante para toda a estrutura e a largura do feixe vertical é em função da dimensão das linhas verticais.

Para formar o feixe um certo número de *staves*, geralmente um terço da periferia do cilindro, são divididas em fases de modo a criar uma matriz planar. A criação de feixes adjacentes tem como objetivo contornar a matriz em um ângulo de indexação igual ao espaçamento do feixe pretendido (Waite, 2002, pp. 34-35). Estas estruturas estão representadas na **Figura 2**.

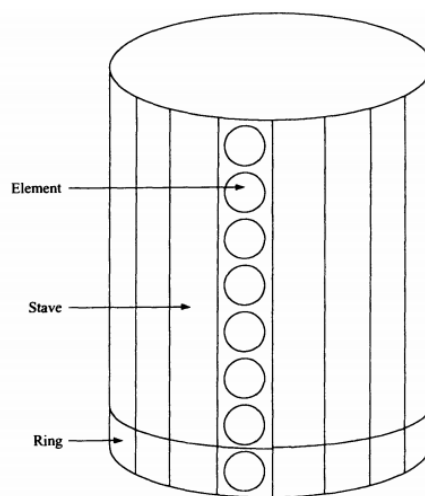


Figura 2: *Array* cilíndrico, correspondente aos usados a bordo das unidades navais.¹⁰

1.6. Nível de Ruído

Devido à facilidade com que as ondas sonoras se propagam neste ambiente, através das vibrações mecânicas das partículas que o constituem, podendo atingir grandes distâncias, juntamente com as diversas fontes existentes, o ambiente subaquático torna-se bastante ruidoso. De facto, o ruído constitui um dos maiores desafios na deteção sonar, uma vez que degrada o sinal útil recebido pelos hidrofones.

No sonar passivo apenas são consideradas duas fontes de ruído. O ruído ambiente pode ter a sua origem na densidade de navegação, precipitação, vida marinha ou no próprio estado do mar. O ruído próprio resulta da operação do sistema acústico ou da plataforma

¹⁰ Fonte: Waite (2002), pp. 34-35.

onde este está inserido. Já no sonar ativo, uma outra fonte tem que ser considerada, que é o ambiente envolvente do projetor, na medida em que introduz uma nova fonte de ruído que degrada o sinal, as reverberações.

Assim, se o sinal emitido (podendo ter a sua origem no próprio projetor ou noutra plataforma) se perder devido ao nível de ruído ser elevado, a equação do excesso de sinal é representada pelas expressões já apresentadas em 1.2.1. e 1.2.2..

1.6.1. Nível de Ruído Ambiente

O ruído ambiente é definido como o sinal recebido por um sistema acústico na ausência de sinais que possam ser atribuídos a uma fonte individual (exemplo dos navios), ou resultantes do chamado ruído próprio, seja do sistema acústico ou de outras fontes relacionadas com a plataforma em que o hidrofone está instalado.

No seu conceito são removidas as contribuições de todas as fontes de ruído da plataforma própria (hélices, máquinas auxiliares, geradores e até o próprio transdutor), bem como o ruído de navios que naveguem na área circundante. Ou seja, todas as fontes identificáveis devem ser removidas, permanecendo apenas o que chamamos de ruído de fundo.

O nível de ruído ambiente (ANL, sigla em inglês para *Ambient Noise Level*), usado como parâmetro na previsão sonar, corresponde ao nível de pressão sonora, em dB, do ruído ambiente relativo a uma onda plana que tem um valor eficaz de pressão correspondente a 1 μ Pa. Apesar de serem medidos em diferentes bandas de frequência, estes são geralmente reduzidos a uma largura de 1 Hz, os chamados níveis espectrais do ruído ambiente (Urick, 1983, p. 202).

As principais fontes de ruído dependem da profundidade do mar, surgindo a necessidade de distinguir *shallow waters* e *deep waters*¹¹. As principais fontes de ruído, em águas pouco profundas, correspondem a: tráfego de navios, atividade industrial (mais significativa em baías e portos), vento e vida marinha (Urick, 1983, pp. 211-215).

A influência do tráfego de navios depende diretamente da área em que o navio navegue, sendo mais relevante nas chamadas rotas de navegação, esquemas de separação de

¹¹ *Shallow Waters*, em geral, correspondem a águas com profundidades inferiores a 200 metros, e *deep waters* a águas cujas profundidades são superiores a 200 metros (Richardson *et al.*, 2013, p.96).

tráfego, estreitos, baías, portos ou em águas costeiras e interiores. Também é mais relevante para frequências operacionais inferiores a 0,5 kHz. No entanto, até aos 100 Hz é a fonte dominante de ruído e é independente das condições meteorológicas e oceanográficas (METOC) vigentes (Hodges 2010, p. 131). Em baías e portos, a atividade portuária e industrial é em geral uma importante fonte de ruído. Além disso, a vida marinha, as marés e a turbulência que caracterizam essas áreas levam a um ambiente bastante ruidoso.

Nas águas costeiras, as principais fontes de ruído são as ondas geradas pelo vento, o rebentamento de ondas de superfície, a vida marinha e o tráfego marítimo. Por vezes, o ruído aqui detetado é originado a longas distâncias, podendo ter a sua origem em águas profundas. De facto, se eliminarmos o efeito da vida marinha e do tráfego marítimo, os valores obtidos estarão de acordo com os encontrados em águas profundas (Urlick, 1983, p. 212).

Em relação ao ruído biológico, a sua influência foi descoberta durante as medições realizadas em áreas costeiras, onde a vida marinha, em geral, tem uma presença mais significativa. No entanto, existem espécies que possuem maior influência no sinal recebido pelos hidrofones, de salientar os cetáceos, crustáceos e alguns peixes de maiores dimensões (Varela, 2001, p. 2.25).

O ruído resultante da atividade sísmica apresenta maior variabilidade e pode resultar de terremotos ou erupções vulcânicas, cuja origem está no fundo do mar. Ocorrendo com frequência e magnitude variável afetam as baixas frequências do espectro, sendo estes fenómenos relevantes em águas profundas (Hodges 2010, p. 128).

A turbulência associada e resultante de correntes predominantes ou transitórias (que podem surgir durante um determinado período) e os movimentos de grande e média escala das principais correntes marítimas também originam ruído de fundo. Essa turbulência criará diferenças de pressão detetáveis pelos sensores (Urlick, 1983, p. 205).

As ondas de superfície são um dos principais fenómenos que afetam o ruído ambiente e a sua influência pode ser detetada desde as baixas frequências até aos 25 kHz, isto é, não apenas na gama inferior do espectro. Nas frequências usuais e adequadas à operação do sonar há ainda valores muito elevados para o ruído originado pelas ondas.

Na **Figura 3** encontra-se representada a influência que cada uma destas fontes possui ao longo do espectro de frequências.

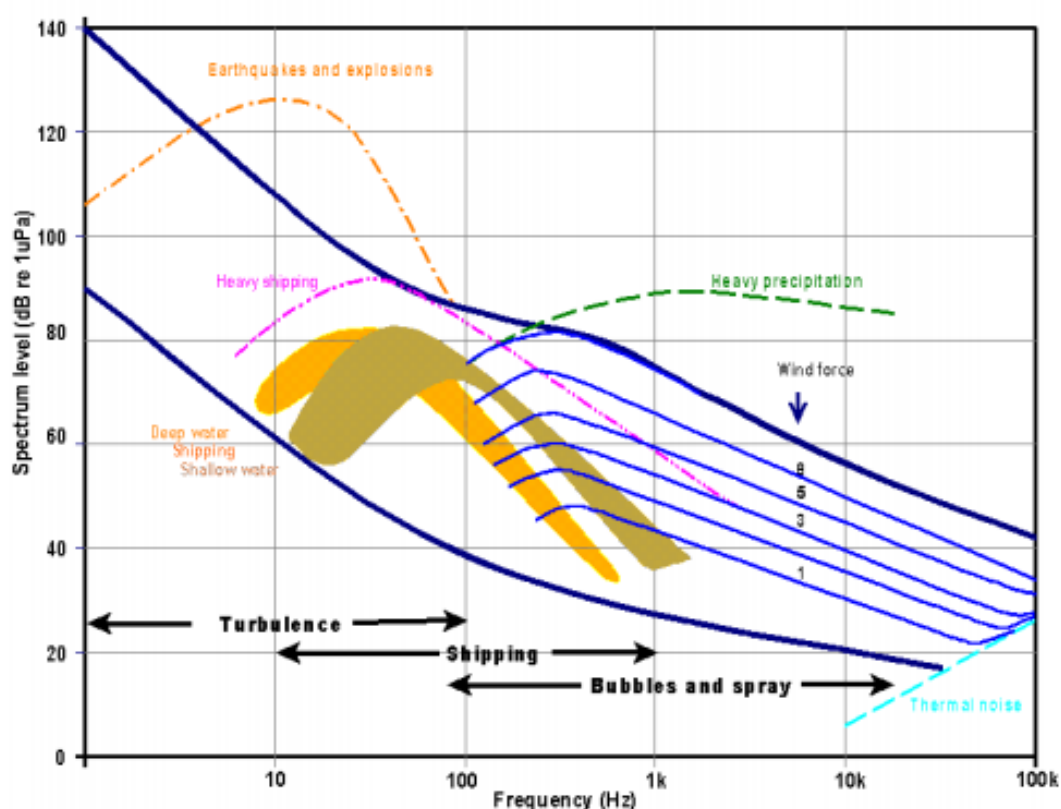


Figura 3: Influência das diversas fontes de ruído no espectro de frequências.¹²

1.6.2. Ruído Irrradiado

O ruído irradiado representa realidades distintas nas duas equações sonar. No caso do sonar ativo este interfere com o sinal recebido pelos hidrofones, enquanto no modo de operação passivo corresponde ao nível de intensidade da fonte que se pretende detetar, localizar e identificar.

A fonte de ruído irradiado depende do que pretendemos detetar, sendo na sua generalidade proveniente de navios, submarinos, torpedos e minas. Os sinais emitidos por essas fontes podem ser extremamente complexos. As plataformas podem ter inúmeros componentes de máquinas rotativas e de combustão, bem como sons associados à guarnição do navio. Normalmente, os componentes de propulsão (motores, turbinas, bombas e hélices) são as principais fontes de ruído (Hodges 2010, p. 183).

¹² Fonte: E. J. Harland, S.A.S. Jones, T. Clarke (2005), p.10.

Os sonares passivos são projetados com o propósito de detetar e explorar o ruído irradiado e distingui-lo dos ruídos de interferência, por exemplo o ruído próprio do sistema acústico, o ruído ambiente e o ruído das plataformas que não sejam úteis (Hodges 2010, p. 183).

O ruído irradiado é analisado em termos de nível de intensidade sonora, cuja unidade de medida é o decibel. Para o sonar, considera-se ruído de interesse o que provém de áreas distantes, correspondendo à intensidade medida a uma determinada distância da fonte (que deverá ser elevada) ajustada à referência padrão, geralmente um metro ou jarda do centro da fonte, adicionando numericamente a perda de propagação entre a posição em que se efetuou a medição e a distância padrão considerada¹³. Na **Figura 4** estão representadas as principais fontes de ruído no navio e a sua fonte.

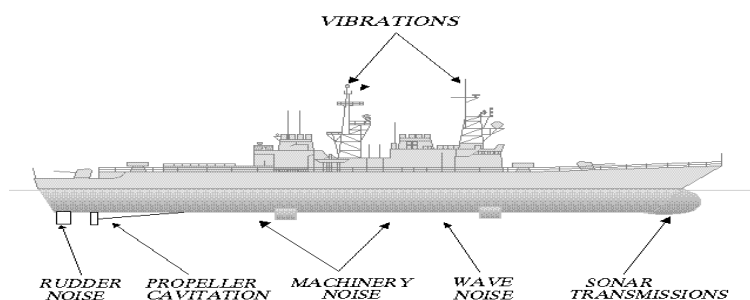


Figura 4: Influência dos vários componentes do navio para o ruído irradiado pelo mesmo, bem como sua localização.¹⁴

O ruído irradiado pelas hélices é distinto do ruído interno das máquinas, visto que estão no exterior do navio e em contato direto com o meio de propagação das ondas acústicas. Existem três tipos principais de ruído gerados pelas hélices: taxa de rotação, cavitação e ressonância.

O ruído das máquinas é gerado pelas suas partes móveis, através de vibrações originadas nas peças recíprocas, como as explosões periódicas nos cilindros de um motor diesel, descontinuidades repetitivas das lâminas das turbinas, dentes da engrenagem e ranhuras dos motores elétricos, desequilíbrios na máquina rotativa, turbulência e cavitação

¹³ Depende das unidades de medida que estejam a ser consideradas. Deve-se utilizar sempre a mesma para todos os cálculos realizados, para que estes representem todos a mesma realidade.

¹⁴ Fonte: https://fas.org/man/dod-101/navy/docs/swos/stu2/NEWIS9_7.html, consultado a última vez a 30/03/2019.

no fluxo de líquido no sistema hidráulico, nas bombas e nas válvulas (Hodges 2010, p. 186). As três primeiras fontes de vibrações dão origem a componentes de banda estreita, enquanto a última produz sinais do tipo banda larga. Se as três primeiras fontes de ruído estão associadas à principal propulsão do navio, estas aumentam em frequência e amplitude com o aumento da velocidade. Em certas velocidades, esses componentes de ruído podem-se combinar com vibrações estruturais da mesma frequência, causando um aumento significativo no sinal irradiado (Hodges 2010, p. 187).

1.6.3. Nível de Ruído Próprio

O ruído próprio difere do irradiado por se considerar o hidrofone instalado na plataforma, e não como um componente isolado localizado no mar a uma distância considerável. Apesar de as fontes de ruído serem as mesmas, a influência destas sobre o receptor vai ser bastante distinta (Urlick, 1983, p. 355).

As características técnicas do sistema acústico e a sua localização no casco permitem reduzir a interferência do ruído sobre o sinal recebido, também o próprio índice de diretividade possibilita reduzir o nível de ruído próprio junto aos hidrofones. Geralmente, estes são instalados em estruturas, os chamados domos¹⁵ sonares, numa posição a vante do navio, longe da instalação propulsora. Assim, o ruído próprio recebido pelos hidrofones é representado pela expressão seguinte (Urlick, 1983, p. 356).

$$NL = NL'^{16} + DI$$

Na **Figura 5** são apresentados os diversos trajetos que podem ser percorridos pelo ruído próprio.

¹⁵ O domo do sonar é a estrutura onde se encontra o transdutor, construída de modo a minimizar a turbulência, reflexões ou refrações da mesma.

¹⁶ NL' representa o nível de ruído recebido nos terminais do hidrofone, considerando que este tem um DI de receção associado. É assim possível obter o SN através do ruído isotrópico que lhe corresponde.

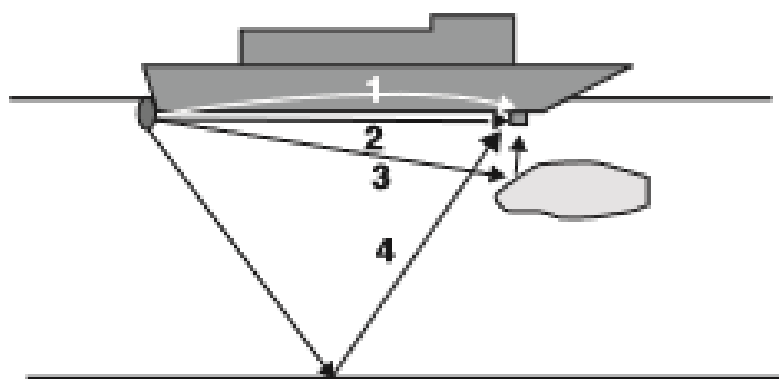


Figura 5: Variedade de trajetos que o ruído gerado por uma plataforma pode percorrer até ser recebido pelo *array* de hidrofones: (1) transmitido pelo casco, (2) caminho direto da água (frequentemente o caso do ruído da hélice), (3) dispersões de volume e dispersão ou reflexão (4) contacto superfície inferior ou (5) contacto com o fundo do oceano.¹⁷

Tal como já referido no subcapítulo anterior, as principais fontes de ruído próprio são os hélices, as máquinas propulsoras, as máquinas auxiliares e a turbulência do deslocamento de água do navio (Hodges, 2010, p. 194). Outras possíveis fontes de ruído próprio incluem o ruído irradiado pela plataforma ou causado pela própria guarnição, que se propaga para os hidrofones. O ruído eletrónico, embora seja uma fonte potencial de ruído próprio, geralmente não é um problema com os amplificadores modernos, dotados de filtros com grande poder de processamento exceto sob condições mais silenciosas ou quando existem problemas de interferência eletromagnética (EMI na sigla em inglês). Possui sempre um valor mínimo que está presente, independentemente da velocidade a que o navio se encontre a navegar. O aumento deste ruído será devido ao incremento da velocidade do navio, e consequentemente do domo sonar, gerando turbulência e afetando o sinal útil com os chamados “ecos falsos”. A instalação propulsora e geradores do navio geram um nível de ruído equivalente, independentemente do aumento de velocidade da plataforma. Já as hélices constituem um problema com o fenómeno de cavitação, sendo esta mais relevante para velocidades superiores.

O ruído próprio é especificado como um nível de pressão sonora (SPL) e tem uma dependência de frequência e velocidade. Na **Figura 6** são apresentados valores de ruído próprio de algumas plataformas.

¹⁷ Fonte: Hodges (2010), p.194.

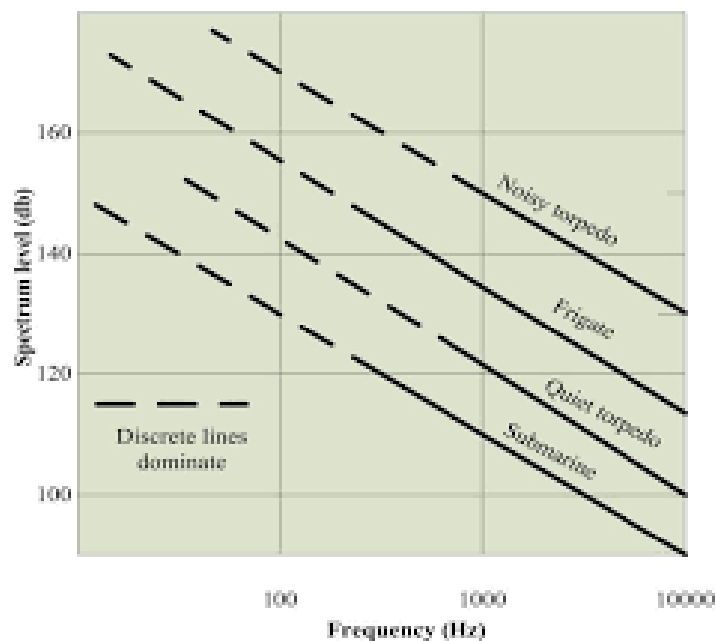


Figura 6: Ruído próprio e sua dependência do espectro de frequências, para submarinos, torpedos e fragatas. Existe um decréscimo do seu valor para frequências mais elevadas, independentemente da plataforma que esteja a ser considerada.¹⁸

1.7. Nível de Reverberação

Quando o sonar ativo transmite um sinal acústico, o eco recebido pelo *array* de hidrofones provém também de fontes distintas do alvo que se pretende detetar, a chamada reverberação. As suas fontes são a superfície, o fundo e o volume de água, neste último tipo de reverberação destaca-se a vida marinha, as bolhas e outras heterogeneidades do meio de propagação. Na **Figura 7** está representada a reverberação resultante da detonação de cargas explosivas.

¹⁸ Fonte: S. Jafri e A. Pervez, *Noise effects on Surface Ship Passive Sonar and possible ASW solution*, p. 31.

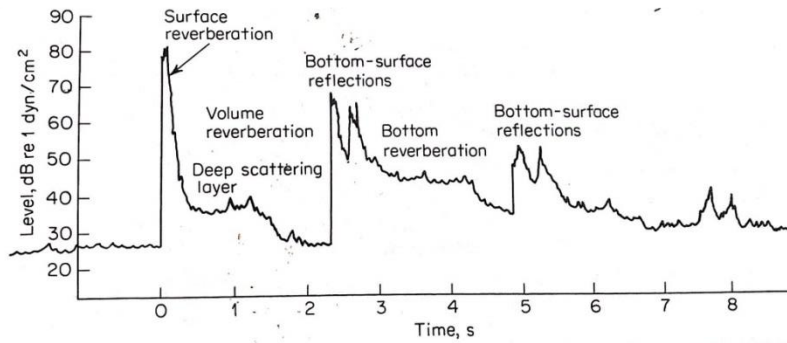


Figura 7: Reverberações resultantes da detonação de cargas explosivas a 800 pés, com um fundo de 6.500 pés de profundidade. As medições foram feitas por hidrofone situado a uma imersão de 135 pés.¹⁹

O RL, tal como o nível intensidade dos projetores, sofre perdas por transmissão, havendo um decréscimo da intensidade do sinal acústico até este deixar de ser detetado. Visto que a equação de excesso de sinal depende da fonte predominante que degrada o sinal útil, é relevante considerar a distância entre o sonar e o alvo que se pretende detetar.

Por vezes, o nível de reverberação apresenta valores superiores ao nível de ruído (estudado no subcapítulo anterior), sendo esta situação usual nas proximidades dos projetores, passando a equação do excesso de sinal a apresentar uma forma distinta, na qual deixa-se de considerar o ruído, pois entende-se que este fica abafado pela reverberação.

$$SE = SL - 2TL + TS - RL - DT$$

A razão fundamental da qual depende a reverberação é chamada de intensidade de reverberação, ou *backscattering strength* ($S_{s,v}$). É a relação entre a intensidade acústica espalhada por uma unidade de superfície ou volume, referenciada à distância de uma jarda, tendo em conta a intensidade da onda plana incidente, na direção da fonte de emissão (Urick, 1983, p. 238).

$$S_{s,v} = 10 \log \frac{I_{scat}}{I_{inc}} \quad 20$$

A reverberação pode ser definida como a relação logarítmica entre a intensidade da mesma e a intensidade de referência (Hodges, 2010, p. 21).

¹⁹ Fonte: Urick (1983), p. 238.

²⁰ Fonte: Urick (1983), p. 238.

$$RL = 10 \log \frac{I_{RL}}{I_{ref}}$$

Contudo, o cálculo da reverberação não pode ser resolvido através da expressão anterior, visto que não somos conhecedores da intensidade acústica da mesma. Assim, este cálculo torna-se bastante mais complexo, dependendo de um conjunto de condições e circunstâncias bastante diversificado.

Para a obtenção de uma expressão que descreva a reverberação, Urick (1983, p. 240) estabelece um conjunto de condições que devem ser assumidas, que não se verificam completamente neste meio de propagação, nomeadamente a propagação retilínea dos raios sonoros, a distribuição homogénea dos espalhadores²¹ (em área ou volume de reverberação), considerando que estes não apresentam variabilidade temporal, e uma densidade de espalhadores tão grande que um grande número de espalhamentos ocorre em uma área (dA) ou volume (dV) elementares de reverberação (para a previsão sonar são consideradas áreas e volumes bastante elevados).

Para a determinação do RL de volume é necessário considerar o projetor com um certo DI a operar num meio com as condições mencionadas anteriormente, que possui um conjunto de espalhadores uniformemente distribuídos. Assim a expressão que representa a reverberação de volume ou de área é idêntica à expressão do nível da intensidade do eco.

A expressão geral²² para o cálculo da reverberação é apresentada de seguida, onde S_v é a força de reverberação de volume, b o padrão direcional do feixe projetado e b' o padrão direcional do feixe recebido.

$$RL = 10 \log \left(\frac{I_0}{r^4} S_v \int b b' dV \right)$$

Para simplificar a expressão anterior utiliza-se o conceito de volume elementar (dV), o qual possui dimensões finitas apesar de bastante diminutas, encontrando-se o volume elementar no plano normal à direção na qual o projetor está a emitir o sinal acústico. Na **Figura 8** encontra-se o dito volume elementar no espaço.

²¹ Considera-se espalhadores os obstáculos existentes no meio cuja dimensão seja inferior ao comprimento da onda acústica, tendo em conta a frequência de operação do sistema.

²² Fonte: Urick (1983), p. 241.

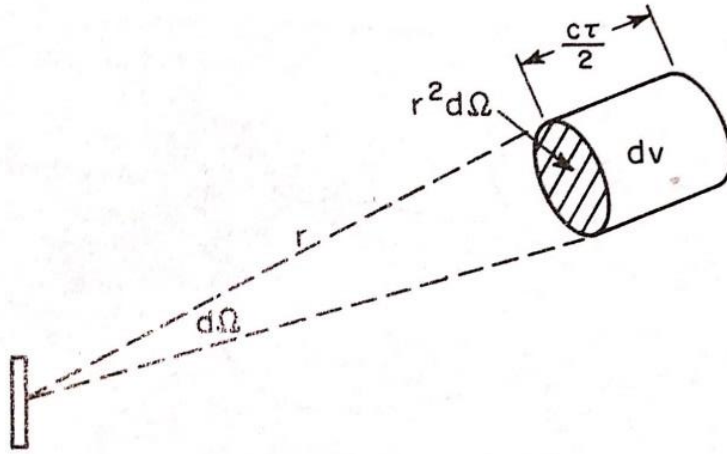


Figura 8: Representação do volume elementar (dV) e do ângulo sólido ($d\Omega$), usados para o cálculo da reverberação de volume.²³

Quando o ângulo sólido ($d\Omega$), apresentado na **Figura 8**, intersesta o espalhador responsável pela reverberação que está a ser estudada (neste caso o obstáculo com volume elementar, dV), a área intersetada pelo dV é representada por $d\Omega r^2$. A reverberação de volume corresponde a essa área multiplicada por $\frac{c\tau}{2}$, com c a velocidade do som e τ a duração do impulso emitido. Assim, a equação anteriormente referida pode ser simplificada.

$$RL_v = SL - 40 \log \frac{ct}{2} + S_v + 10 \log V$$

$$V = \frac{c\tau}{2} \Psi r^2$$

Em que $r = \frac{ct}{2}$ corresponde à distância entre o sonar e os espalhadores existentes no meio de propagação, t corresponde ao tempo entre a emissão do sinal acústico e recepção do seu eco pelo hidrofone e c a velocidade do som, tendo em conta as condições do meio. Para o cálculo do volume $\frac{c\tau}{2}$ representa a espessura do espalhador, r^2 a área da face perpendicular ao raio sonoro resultante e Ψ representa a largura do feixe resultante da integração das diversas larguras de feixe do projetor e receptor, tendo em conta todos os ângulos, ou seja, $\Psi = \int d\Omega$ que corresponde ao integral do feixe elementar no domínio direcional esférico (θ, φ) .

²³ Adaptado de Urlick (1983), p. 241.

No caso das reverberações de superfície e de fundo, considera-se a existência de uma superfície quase plana responsável pelo espalhamento. A sua expressão²⁴ geral é bastante semelhante à de volume.

$$RL = 10 \log \left(\frac{I_0}{r^4} S_s \int b(\theta, \varphi) b'(\theta, \varphi) dA \right)$$

Nesta equação $b(\theta, \varphi)$ é o padrão do feixe do projetor, $b'(\theta, \varphi)$ o padrão do feixe recebido, I_0 a intensidade axial na unidade de distância ($SL = 10 \log I_0$), r é a distância ao espalhador e S_s a intensidade de reverberação de superfície.

Para a sua simplificação é também necessário considerar a área elementar. Para estes cálculos iniciais não é necessário a distinção entre reverberação de superfície e reverberação de fundo. Na **Figura 9**²⁵ são representados a unidade de área elementar (dA) e a sua posição relativamente ao projetor.

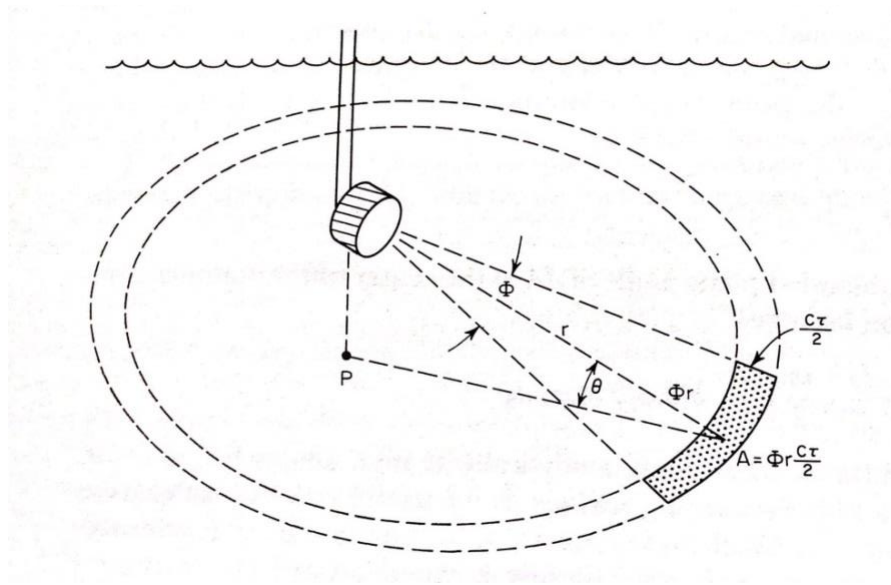


Figura 9: Área considerada para os cálculos da reverberação de superfície e fundo. Por convenção considera-se que o projetor está posicionado ao centro.

Esta área elementar (dA) depende da duração do impulso (τ) e da velocidade do som (c). A integração angular é apenas realizada para ângulos horizontais, tal como demonstrado na **Figura 9**.

²⁴ Fonte: Urick (1983), p. 244.

²⁵ Fonte: Urick (1983), p. 246.

$$\Phi = \int_0^{2\pi} b(0, \varphi) b'(0, \varphi) d\varphi$$

Assim, Φr é a dimensão da superfície, na qual se considera ocorrer reverberação. Considerando estas simplificações é possível obter uma expressão final semelhante à obtida para a reverberação de volume.

$$RL_s = SL - 40 \log r + S_s + 10 \log A$$

$$A = \frac{c\tau}{2} \Phi r$$

Até agora, considerou-se que as reverberações de fundo e superfície eram equivalentes, contudo tal não corresponde à realidade, visto que as suas características são diferentes.

Existem, assim, um conjunto de fatores que influenciam o valor de reverberação de fundo recebida, nomeadamente o tipo de fundo, a frequência do sistema acústico, o *grazing angle*²⁶ ou ângulo de incidência, o perfil e rugosidade do fundo.

A reverberação de superfície é influenciada pelo estado do mar, sendo que este depende do vento, frequência de emissão do projetor e ângulo de incidência²⁷.

1.8. Perdas de Transmissão

O meio submarino é bastante complexo, ocorrendo no seu seio um conjunto de fenómenos que afetam o sinal acústico emitido pelo sonar. Durante a sua propagação este torna-se mais fraco e distorcido.

As perdas de transmissão (TL) indicam a quantidade de sinal perdido, em decibéis, devido à propagação da onda sonora no meio, distinguindo-se perdas por absorção e perdas por dispersão. As perdas de transmissão são calculadas tendo em conta a intensidade acústica a uma jarda do projetor (I_0) e a intensidade num ponto distante (I_1), normalmente o alvo.

²⁶ O *grazing angle* na acústica é usualmente definido como sendo o ângulo entre o raio em propagação e a horizontal.

²⁷ O ângulo de incidência é o ângulo entre o raio incidente e a normal à superfície que separa dois meios distintos. Para a interseção com superfícies horizontais é o ângulo entre os raios em propagação e a vertical.

$$TL = 10 \log \frac{I_0}{I_1}$$

1.8.1. Perdas por Dispersão Geométrica

Na dispersão ocorre uma diminuição da intensidade do sinal acústico devido à geometria da propagação. Existem diversas geometrias que podem ser consideradas nas perdas de transmissão, nomeadamente a esférica, a cilíndrica, a hiper-esférica e a separação vertical de raios (Urick, 1983, pp. 100-102).

Para a propagação esférica considera-se o meio como homogéneo, não tendo fronteiras e sem perdas por atenuação, e paralelamente assume-se que o transdutor emite o sinal sonoro em todas as direções com a mesma intensidade, como se de uma esfera se tratasse. Como não há perdas por transmissão, a potência que atravessa todas as esferas de raio diferente é a mesma (Urick, 1983, pp. 100-101).

$$P = 4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2$$

Se a potência se mantém, ocorre uma diminuição da intensidade por unidade de área, proporcional ao inverso do quadrado do raio dessa esfera. Neste caso, a perda de transmissão é dada pela expressão seguinte.

$$TL = 20 \log r$$

No caso da propagação cilíndrica considera-se que o meio está limitado, superiormente e inferiormente, dependendo a potência da altura e do raio do cilindro (Urick, 1983, p.101).

$$P = 2\pi r_1 H I_1 = 2\pi r_2 H I_2$$

No caso da propagação cilíndrica, o produto da pressão eficaz pela raiz quadrada do raio é constante. Neste caso, a perda de transmissão é dada pela expressão seguinte.

$$TL = 10 \log r$$

Existe ainda um terceiro tipo de dispersão geométrica, a chamada hiper-esférica. A propagação neste caso é distinta, na medida em que o sinal é gerado por uma fonte

pulsada²⁸, sendo que, as perdas neste caso serão superiores, devido à extensão temporal. É relevante no oceano profundo (Urlick, 1983, pp. 102-103).

$$TL = 30 \log r$$

Urlick refere ainda a possibilidade de calcular as perdas de transmissão para os modelos de *raytrace*²⁹, que inclusive são utilizados nas ferramentas de previsão sonar. Este integra duas componentes, a chamada separação vertical de raios e a distância à fonte acústica. Será a forma de calcular as perdas que melhor representa a realidade encontrada (Urlick, 1983, pp. 126-128).

$$TL = 10 \log \frac{r \Delta h}{\Delta \theta} \frac{c_2}{c_1}$$

Nesta equação, r é a distância de propagação, Δh a distância de separação vertical entre raios, $\Delta \theta$ a abertura angular entre os raios na projeção, c_1 corresponde à velocidade do som ao nível do projetor e c_2 a velocidade do som ao nível do ponto de avaliação.

1.8.2. Perdas por Absorção

A propagação do som num meio, neste caso a água do mar, acontece por compressões e rarefações sucessivas das partículas que o constituem, sem que estas alterem a sua posição média. Contudo, durante este processo há conversão de energia acústica em calor, ou seja, existe atenuação.

São diversas as causas que geram a absorção, sendo que esta depende do próprio meio em que ocorre a propagação, por exemplo os valores obtidos para a água do mar são bastante superiores aos da água pura. A intensidade decai exponencialmente com a distância, se o coeficiente de absorção for constante. Assim, segundo Kinsler *et al.* (1982) p. 141, podem apontar-se como motivos deste processo os seguintes efeitos:

- Perdas devidas ao efeito da viscosidade, que ocorrem sempre que há movimento relativo entre porções adjacentes, dentro do meio, como acontece nas

²⁸ Consiste na emissão das chamadas *pulse waves*.

²⁹ Os modelos de *raytrace* simplificam o estudo do feixe de emissão dos sonares, representando-o através de raios em camadas, cujos gradientes de velocidade do som em função da profundidade são uniformes. Assim, a trajetória dos raios refratados é circular, nessas camadas, sendo mais fácil proceder à sua modelação (Urlick, 1983, pp. 120-126).

compressões e expansões que acompanham a transmissão de onda sonora. Estas podem ser vistas como perdas por atrito.

- Perdas por condução de calor que acontecem pela condução de energia térmica (calor) entre maiores temperaturas nas compressões e menores temperaturas nas expansões.

- Perdas associadas a trocas moleculares, as quais incluem a conversão de energia cinética das moléculas em: a) energia potencial; b) energias de vibração e de rotação; c) energias de associação e dissociação química entre iões em dissolução na água do mar, como sejam sulfato de magnésio e ácido bórico.

A viscosidade bruta manifesta-se no retardo necessário para que as moléculas de água se movimentem, sob pressão, para os espaços livres da estrutura iónica da água do mar (Urick, 1983, p. 105). Assim sendo, depende de uma das principais características dos fluidos, a chamada compressibilidade, definida por $\beta = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p}$, com V representando o volume e p a pressão. No caso dos líquidos e em particular da água do mar a compressibilidade é mínima quando comparada com a dos gases, daí as maiores velocidades do som nos líquidos.

Contudo, foi demonstrado em diversas determinações experimentais que na água do mar a atenuação é superior à prevista considerando unicamente as perdas por viscosidade. Isto deve-se a um efeito denominado relaxação estrutural. A água do mar possui diversos sais dissolvidos, sendo que dois destes influenciam de forma significativa a absorção do som, nomeadamente o sulfato de magnésio e o ácido bórico. Com a propagação da onda sonora geram-se zonas de compressão e rarefação, que implicam significativas diferenças de pressão, provocando associações e dissociações sucessivas dos sais mencionados (Urick 1983, pp. 108-109).

O tempo de relaxação, que se encontra associado a este processo, consiste no tempo necessário para que a estrutura iónica regresse a 63% do estado em que se encontraria, se não ocorresse propagação, ou seja, se encontre no estado normal ou de baixa energia. Quando o valor deste se encontra próximo do período da onda sonora, a absorção é mais significativa. O potencial de Hidrogénio (pH) da água também influencia este processo, pelo que o seu valor é entrado nalgumas dessas fórmulas para calcular o coeficiente de absorção (Costa, 2017, pp. 45-48).

Na **Figura 10** é apresentado um gráfico, no qual é apresentado a contribuição do efeito do sulfato de magnésio, do ácido bórico, do *scattering* e da difração dos canais de som para o valor da absorção do som.

Adicionalmente podemos notar que basta haver absorção para haver um decaimento exponencial da intensidade com a distância (do tipo $I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$; I para intensidade, x a distância, α o coeficiente de absorção e I_0 a intensidade na projeção), decaimento esse que ainda é acentuado por efeito da dispersão geométrica.

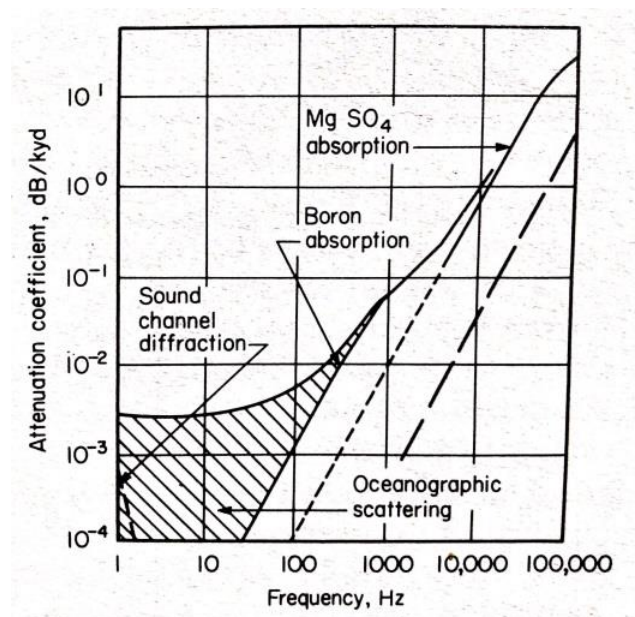


Figura 10: Causas de atenuação e absorção na água do mar.³⁰

1.8.2.1. Fórmulas para o Cálculo do Coeficiente de Absorção

Diversas fórmulas foram desenvolvidas para serem incluídas nas equações sonar. Neste subcapítulo serão abordadas as existentes para este efeito, sendo que as limitações para a sua utilização são diferentes.

Thorp³¹ (1967) desenvolveu uma fórmula que apenas depende da frequência do transdutor, não considerando a variação da temperatura, salinidade, profundidade e pH. Apesar disso inclui uma correção para a atenuação que se verifica nas frequências inferiores

³⁰ Fonte: Urlick (1983), p. 111.

³¹ Fonte: Urlick (1983), p. 108.

do espectro, tendo o valor de 0,003. Deve ser adotada para temperaturas de 4°C preferencialmente.

$$\alpha = \frac{0,1f^2}{1+f^2} + \frac{40f^2}{4,100+f^2} + 2,75 \times 10^{-4}f^2 + 0,003$$

Com f em Hz e α em dB/m.

Fisher e Simmons³² (1977) já consideram a influência que a pressão e temperatura têm sobre o coeficiente de absorção. Contudo, assumem valores constantes para a salinidade e pH, sendo respetivamente de 35 kg/m³ e 8³³. A temperatura pode estar compreendida entre 0° C e 30°C, e a pressão entre 1 e 400 atmosferas.

$$\alpha = \frac{Af_1f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{Bf_2f^2}{f_2^2 + f^2} + Cf^2$$

$$\alpha = \alpha [B(OH)_3] + \alpha (MgSO_4) + \alpha (H_2O)$$

$$f_1 = 1,32 \times 10^3 (T + 273) e^{\left(\frac{-1700}{T+273}\right)}$$

$$f_2 = 1,55 \times 10^7 (T + 273) e^{\left(\frac{-3052}{T+273}\right)}$$

$$A = 8,95 \times 10^{-8} (1 + 2,3 \times 10^{-2}T - 5,1 \times 10^{-4}T^2)$$

$$B = 4,88 \times 10^{-7} (1 + 1,3 \times 10^{-2}T) \times (1 - 0,9 \times 10^{-3}P_0)$$

$$C = 4,76 \times 10^{-13} (1 - 4,0 \times 10^{-2}T + 5,9 \times 10^{-4}T^2) \times (1 - 3,8 \times 10^{-4}P_0)$$

Nelas T é a temperatura em graus Celcius e P_0 a pressão em atmosferas.

f em kHz

T em °C

S em g/Kg

Existe, ainda, a chamada fórmula de Fisher e Simmons simplificada³⁴ (1977), que apenas pode ser utilizada quando a temperatura corresponde a 5°C e a pressão a 0 bar.

³² Fonte: Kinsler *et al.* (1982), pp. 158-160.

³³ Valores normais de pH no oceano situam-se entre 7,5 e 8,5.

³⁴ Fonte: Kinsler *et al.* (1982), p. 398.

$$\alpha = f^2 \left(\frac{8 * 10^{-5}}{0,7 + f^2} + \frac{0,04}{6000 + f^2} + 4 * 10^{-7} \right)$$

A expressão desenvolvida por Ainslie e McColm³⁵ (1988) já considera a influência de todos os fatores mencionados, nomeadamente temperatura, salinidade, pH, profundidade e frequência do transdutor, não existindo limitações para o emprego da mesma.

$$\alpha = 0,106 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} e^{(pH-8)/0,56} + 0,52 \left(1 + \frac{T}{43} \right) \left(\frac{S}{35} \right) \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} e^{-\frac{D}{6}} + 0,00049 f^2 e^{-\left(\frac{T}{27} + \frac{D}{17}\right)}$$

$$f_1 = 0,78 \sqrt{\left(\frac{S}{35}\right) * e^{\frac{T}{26}}}$$

$$f_2 = 42 e^{\frac{T}{17}}$$

f em kHz

T em °C

S em g/Kg

As fórmulas de François e Garrison (1982)³⁶, tal como a anterior, consideram todos os fatores que influenciam a absorção, sendo as seguintes:

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 F_1 F^2}{F_1^2 + F^2} + \frac{A_2 P_2 F_2 F^2}{F_2^2 + F^2} + A_3 P_3 F^2$$

$$A_1 = \frac{8,86}{c} * 10^{0,78 * pH - 5}$$

$$P_1 = 1$$

$$F_1 = 2,8 \left(\frac{S}{35}\right)^{0,5} 10^{4 - \left(\frac{1245}{T + 273}\right)}$$

$$A_2 = 21,44 \frac{S}{c} (1 + 0,025T)$$

$$P_2 = 1 - 1,37 * 10^{-4} D + 6,2 * 10^{-9} D^2$$

³⁵ Fonte: Ainslie e McColm (1998), pp. 1672-1673.

³⁶ Fonte: Hodges (2010), p. 93.

$$F_2 = \frac{8,17 * 10^{8 - (\frac{1990}{T+273})}}{1 + 0,0018(S - 35)}$$

$$P_3 = 1 - 3,83 * 10^{-5}D + 4,9 * 10^{-10}D^2$$

Para $T \leq 20^\circ C$:

$$A_3 = 4,937 * 10^{-4} - 2,59 * 10^{-5}T + 9,11 * 10^{-7}T^2 - 1,5 * 10^{-8}T^3$$

Para $T > 20^\circ C$:

$$A_3 = 3,964 * 10^{-4} - 1,146 * 10^{-5}T + 1,45 * 10^{-7}T^2 - 6,5 * 10^{-10}T^3$$

f em kHz

T em $^\circ C$

S em g/Kg

As fórmulas de Mellen *et al.* (1987)³⁷, sendo que estas também contemplam todos os fatores que influenciam o coeficiente, sendo representadas pelas seguintes fórmulas.

$$\alpha = A_1 (MgSO_4) + A_2 [B(OH)_3] + A_3 (MgCO_3) + 0.0003f^2$$

$$A_1 = 0,5 * 10^{-\frac{D}{20}}$$

$$A_2 = 0,1 * 10^{pH-8}$$

$$A_3 = 0,03 * 10^{pH-8}$$

$$F_1 = 50 * 10^{\frac{T}{60}}$$

$$F_2 = 0,9 * 10^{\frac{T}{70}}$$

$$F_3 = 4,5 * 10^{\frac{T}{30}}$$

f em kHz

T em $^\circ C$

S em g/Kg

³⁷ Adaptada de Hodges (2010), p. 94.

Todas aquelas fórmulas foram programadas em Matlab, tendo sido criado uma função pronta a utilizar.

1.9. Refletividade do Alvo

Na equação do sonar ativo, o parâmetro *target strength* (TS) ou refletividade do alvo, também no contexto naval designado de índice de reflexão, refere-se ao eco refletido por um alvo submerso, que é depois detetado pelos receptores e processado. Esses alvos podem ser objetos de interesse militar, como submarinos, minas ou até torpedos. Também cardumes de peixes têm um TS associado. Excluídos da categoria de alvos estão heterogeneidades do mar de extensão indefinida, tais como camadas de espalhamento, o fundo e a superfície do mar. Este parâmetro não é considerado para a equação de sonar passivo, visto que não há nenhum sinal incidente na plataforma que se pretende detetar e identificar.

Este pode ser definido tendo em conta a intensidade acústica incidente (I_i) e a intensidade acústica refletida (I_r), a um metro ou uma jarda do alvo, através da seguinte expressão³⁸.

$$TS = 10 \log \frac{I_r}{I_i}$$

Quando feitas as medições para o cálculo do TS, os valores são reduzidos para um metro (ou uma jarda) do centro acústico do alvo. Este ponto fictício, dentro ou fora do alvo, é onde o som parece originar-se com base em medições realizadas à distância (Urick, 1983, p. 292). Na **Figura 11** está representado em esquema o centro acústico de um alvo.

³⁸ Fonte: Hodges (2010), p. 167.

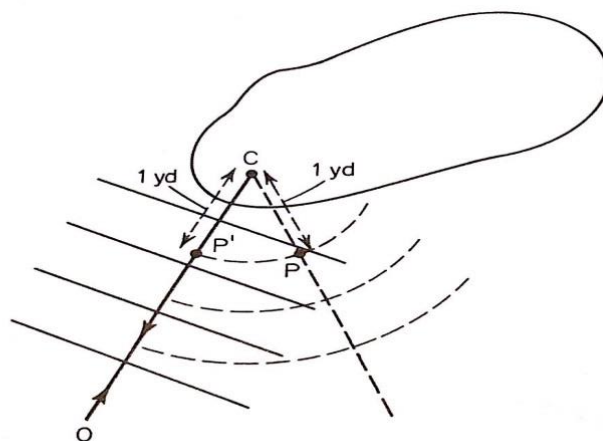


Figura 11: Representação do centro acústico do alvo tendo em conta as ondas incidentes e refletidas.³⁹

O TS influencia significativamente a previsão sonar, daí que os seus valores sejam calculados através de provas acústicas, mas, por terem classificação de segurança, não são divulgados, pois o seu conhecimento dá vantagem tática ao navio que se encontra a efetuar deteção.

O cálculo teórico deste parâmetro foi realizado para formas geométricas muito simples, como é o caso das esferas. Para estas, se o seu diâmetro for muito superior ao comprimento de onda do sinal acústico, define-se que a superfície equivalente é igual à superfície do círculo máximo da esfera (Varela, 2001, p. 2.42).

De referir que os valores de TS, em norma são negativos, visto que a intensidade refletida é inferior à incidente, contudo no centro acústico do alvo os valores são positivos. Este método para determinar o TS é pouco utilizado, visto que é difícil conhecer exatamente qual o centro acústico dos alvos, bem como as perdas de transmissão até um metro do mesmo.

É importante distinguir os TS de sonares mono-estáticos e bi-estáticos. O TS de sonar mono-estáticos é em função do aspeto do alvo⁴⁰, à medida que este sofre rotação no plano, já num TS bi-estático é em função desse ângulo de rotação e do ângulo entre os

³⁹ Fonte: Urick (1983), p. 292.

⁴⁰ O “aspeto do alvo” é a aparência do mesmo na perspetiva do projetor-receptor usado na tentativa de deteção. Por exemplo no caso do alvo submarino o “aspeto do alvo” será diferente caso seja detetado de proa, popa ou través.

ângulos incidentes e refletidos (Hodges, 2010, p. 167). Na **Figura 12** é possível observar um TS bi-estático.

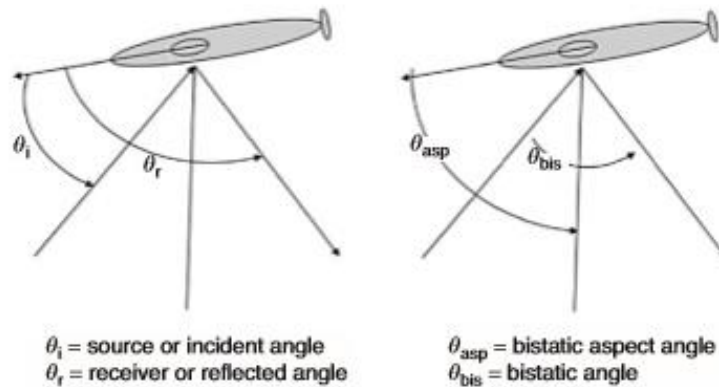


Figura 12: TS bi-estático.⁴¹

A primeira imagem especifica a fonte ou ângulo de incidência, θ_i , e o ângulo receptor ou refletido, em relação ao eixo do alvo. A segunda imagem descreve o aspeto do alvo bi-estático, θ_{asp} , que é o centro dos ângulos incidente e refletido em relação ao eixo do alvo, e o ângulo bi-estático, θ_{bis} , que é a diferença entre os ângulos incidente e refletido. A força do alvo mono estático requer apenas θ_{asp} (Hodges, 2010, pp. 167-168).

No contexto desta dissertação, a ferramenta informática desenvolvida para apoio à previsão sonar aplica-se apenas a sonares mono-estáticos.

1.9.1. Refletividade de Formas Geométricas Simples

A esfera é uma das formas geométricas mais simples, daí que seja das poucas cujo valor pode ser determinado teoricamente. Geralmente, as condições impostas à mesma são que a sua superfície seja lisa, que a sua capacidade de reflexão seja isotrópica (reflete de modo igual em todas as direções) e que a onda incidente seja plana, sendo a sua intensidade representada por I_i . Assim, é possível determinar qual a quantidade de energia que intersesta a esfera.

$$\pi r^2 I_i^{42}$$

⁴¹ Fonte: Hodges (2010), p. 168.

⁴² Fonte: Hodges (2010), p. 169.

A intensidade sonora refletida é, assim, dependente da quantidade de energia e da distância ao centro da esfera em que esta é medida, resultando a expressão seguinte ⁴³.

$$I_r = \frac{\pi r^2 I_i}{4\pi x^2}$$

Assim o TS para uma esfera é apresentado de seguida.

$$TS_{esf} = 10 \log \frac{I_r}{I_i} = 10 \log \frac{r^2}{4}^{44}$$

Tendo em conta esta simplificação, uma esfera perfeita com um raio de 2 metros, terá um TS de 0 dB e será independente da orientação. Nos testes, uma esfera pode ser usada para fornecer um nível de referência para uso em comparações com alvos reais de interesse. No entanto, uma esfera de metal oca raramente satisfaz o critério requerido porque pode distorcer com a imersão e não é suficientemente rígida (Hodges, 2010, p. 169).

Tal como é possível determinar valores teóricos para a esfera, também são conhecidos os TS de outras formas geométricas simples, de cujas aproximações é possível determinar o índice de refletividade para minas, torpedos e submarinos, apenas sendo necessário conhecer as suas dimensões e estruturas. Na **Tabela 2** são apresentados valores para figuras simples.

⁴³ Fonte: Hodges (2010), p. 169.

⁴⁴ Fonte: Waite (2002), p. 68.

Geometric form	Target strength = $10 \log(A)$	Direction	Conditions
Sphere (large)	$R^2/4$	All	$kR \gg 1$ $r \gg R$
Sphere (small)	$1082R^6/\lambda^4$	Normal	$kR \ll 1$ $kr \gg 1$
Ellipsoid	$[bc/(2a)]^2$	Parallel to a, b, c are semimajor axis	$ka, kb, kc \gg 1$ $r \gg a, b, c$
Cylinder	$RL^2/(2\lambda)[\sin(\beta)/\beta]^2 \cos^2(\theta)$	At θ with normal, $\beta = kL \sin(\theta)$	$kR \gg 1$ $r > L^2/\lambda$
Convex surface	$R_1 R_2/4$	Normal	$kR_1, kR_2 \gg 1$ $kr \gg 1$
Smooth convex object	$A/(16\pi)$	Average in all directions, A = total surface area	All dimensions and curvature large compared to λ
Rectangular plate	$L_1 L_2/\lambda^2 [\sin(\beta)/\beta]^2 \cos^2(\theta)$	At angle θ to normal in plane of side L_1 , $\beta = kL_1 \sin(\theta)$	$r > L_1^2/\lambda$ $kL_2 \gg 1$ $L_1 > L_2$
Circular plate	$(\pi R^2/\lambda)^2 [2J_1(\beta)/\beta]^2 \cos^2(\theta)$	At θ with normal, $\beta = 2kR \sin(\theta)$	$r > R^2/\lambda$ $kR \gg 1$
Triangular corner reflector	$L^4/(3\lambda^2)(1 - 0.00076\theta^2)$	At θ to axis of symmetry, L = length of edge	Dimensions large compared to λ

Tabela 2: Valores de TS estimados para formas geométricas simples, as quais depois podem ser utilizadas para prever valores para minas, torpedos e submarinos.⁴⁵

A figura que mais se assemelha aos interesses militares é um cilindro com extremidades hemisféricas (Waite, 2002, p. 72).

1.9.2. Refletividade para Submarinos

Como já foi referido anteriormente, as diversas marinhas não divulgam os valores de TS dos submarinos, por constituírem informação classificada.

Os ecos de alvos submarinos incluem reflexões do perfil externo e reflexões ou dispersão de estruturas sobre o casco de pressão. Os ecos são causados pela reflexão numa superfície normal à onda incidente e são chamadas reflexões especulares de incidência normal. Todas as outras reflexões do perfil externo estão em ângulos não normais e não direccionadas para o receptor (Waite, 2002, p. 74).

Nas frequências de operação dos sonares, os tanques de lastro parcialmente preenchidos de ar e todas as áreas de inundação livre são transparentes e, portanto, os reflexos dessas superfícies externas são de baixa intensidade, sendo dificilmente detetados

⁴⁵ Fonte: Hodges (2010), p. 173.

esses ecos. O casco de pressão, sendo sustentado pelo ar, fornece bons reflexos e um eco significativo (Waite, 2002, p. 74).

O TS de um submarino pode ser obtido através da seguinte expressão⁴⁶, em que a corresponde ao raio, L ao comprimento da estrutura do submarino, θ o ângulo em relação à normal e λ o comprimento de onda do sinal acústico emitido.

$$TS_{submarino} = 10 \log \left[\frac{aL^2}{2\lambda} \cos^2 \theta \right]$$

Medições práticas de TS resultam em dependências similares juntamente com algumas incertezas de medição. Muitas destas são relatadas na literatura e muitas vezes é alegado que elas dão suporte a um padrão tipo "borboleta", como se pode observar na **Figura 13**.

Através da análise da **Figura 13**, é importante frisar que o TS toma valores bastante superiores na marcação do través, em detrimento da proa ou popa. Não obstante, os avanços tecnológicos das últimas décadas contribuíram para uma diminuição acentuada dos TS, sendo cada vez mais difícil detetar a presença dos submarinos modernos.

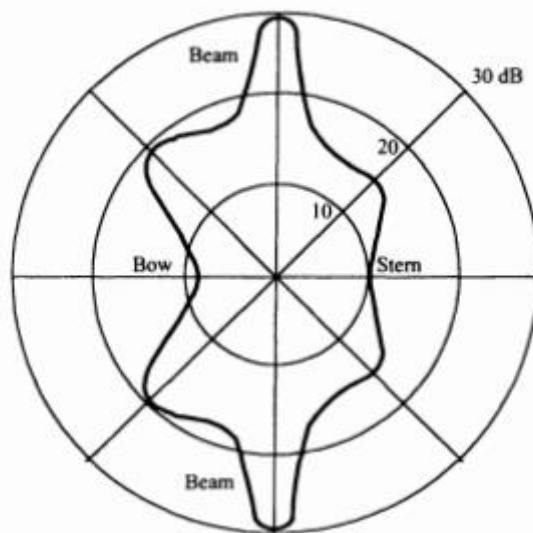


Figura 13: Distribuição do TS em função da marcação relativa ao submarino, que segue um padrão tipo "borboleta".⁴⁷

⁴⁶ Fonte: Waite (2002), p. 74.

1.9.3. Refletividade para Minas

As minas podem frequentemente ser aproximadas por uma esfera ou um cilindro com extremidades hemisféricas, sendo possível obter o valor de TS através da seguinte expressão⁴⁸.

$$TS_{mina} = 10 \log \left[\frac{aL^2}{2\lambda} \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2 \cos^2 \theta \right]$$

Em que a corresponde ao raio, L ao comprimento da estrutura da mina, θ o ângulo em relação à normal, λ o comprimento de onda do sinal acústico emitido e $x = \frac{2\pi L}{\lambda} \sin \theta$.

1.9.4. Refletividade para Torpedos

Um torpedo é basicamente cilíndrico com um nariz achatado ou arredondado, e as mesmas fórmulas podem ser usadas para estimar o seu TS.

$$TS_{torpedo} = 10 \log \left[\frac{aL^2}{2\lambda} \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2 \cos^2 \theta \right]$$

Em que a corresponde ao raio, L ao comprimento da estrutura do torpedo, θ o ângulo em relação à normal, λ o comprimento de onda do sinal acústico emitido e $x = \frac{2\pi L}{\lambda} \sin \theta$.

1.10. Limiar de Detecção

Os sinais acústicos detetados pelos sonares, sejam os ecos dos sonares ativos ou as ondas sonoras emitidas pelos alvos no sonar passivo, são detetados num meio onde predominam o ruído e a reverberação (no sonar ativo). Para que seja possível a determinação da localização e identificação dos alvos, o sistema de sonar deve primeiro detetar a presença do sinal neste “plano de fundo”, ou seja, o sistema deve determinar ou ajudar o utilizador a observar, se o sinal está ou não ocorrendo dentro do intervalo de tempo considerado. O processo de deteção requer uma decisão por parte deste utilizador,

⁴⁷ Fonte: Waite (2002), p. 76.

⁴⁸ Fonte: Waite (2002), p. 72.

usando certos critérios para determinar se, o sinal realmente ocorreu ou não, durante o intervalo de observação (Urlick, 1983, p. 377).

Assim, o limiar detecção (DT, sigla em inglês para *detection threshold*) é o nome dado à relação sinal-ruído, ou seja, à relação entre a potência do sinal e a potência do ruído/reverberação. Depende do desenho do próprio sistema acústico, das características do *array* de receptores e da própria avaliação do utilizador no momento em que se efetua a detecção (Urlick, 1983, pp. 378-379).

Como este parâmetro está dependente da experiência do operador, a sua determinação está sujeita a erros de perceção, o que pode comprometer a previsão sonar. Contudo, Urlick (1983), pp. 383-403, propõe um conjunto de métodos que permitem o cálculo aproximado do DT em condições ambientais onde o ruído seja um fator determinante. De frisar que estes são valores aproximados e realistas, apesar de não serem exatos. O DT pode ser definido através de uma relação logarítmica, tal como representado na expressão⁴⁹ seguinte.

$$DT = 10 \log \frac{S}{N}$$

Nela S representa a potência do sinal na banda de receção e N a potência do ruído espectral⁵⁰, também na banda de receção.

Assim, o DT é um parâmetro das equações sonar que diminui o alcance da previsão sonar. Quanto maior o valor atribuído ao limiar, ou seja, quanto maior for a relação sinal-ruído mínima definida, menor será o valor resultante da equação do excesso de sinal. Por outras palavras, o limiar de detecção corresponde ao valor mínimo de relação sinal-ruído, para que seja possível determinar a presença, ou não, de um contato sonar. Na **Tabela 3** é apresentada a matriz binária proposta por Urlick (1983) para a tomada de decisão.

⁴⁹ Fonte: Urlick (1983), p. 379.

⁵⁰ Definido como o seu nível de intensidade em dB para uma largura de banda de 1 Hz.

		Decisão	
		Sinal presente	Ausência de sinal
Situação real	Sinal presente	Deteção efetiva $p(D)$	Falha na deteção $1 - p(D)$
	Ausência de sinal	Falso alarme $p(FA)$	Deteção impossível $1 - p(FA)$

Tabela 3: Matriz de decisão binária para a decisão da presença, ou não, de um contacto sonar num meio dominado pelo ruído.⁵¹

Quando um sinal está de facto presente nos terminais de entrada do receptor, duas decisões, ausente ou presente, são possíveis. Quando um sinal está ausente, as mesmas duas decisões podem ser tomadas. Ao tomar essa decisão binária de escolha forçada, quatro possibilidades podem representar a realidade. Duas decisões estão corretas e duas incorretas, estas aparecem como os elementos diagonais da matriz (Urlick, 1983, pp. 390-392).

Estes acontecimentos são representados através de probabilidades, $p(D)$ e $p(FA)$ que são independentes e a sua utilização permite determinar qual o índice de deteção (d) a utilizar, sendo que esse índice será posteriormente utilizado nas curvas características de operação do receptor ou *Receiver-Operating-Characteristic* (sendo ROC⁵² a sua sigla em inglês), representadas na **Figura 14**. Estas curvas expressam a evolução de $p(D)$ e $p(FA)$ de acordo com o limiar de deteção estabelecido (Urlick, 1983, pp. 390-392).

Uma capacidade fundamental dos sonares é a identificação de ecos, apesar da existência de ruído e reverberação, evitando a existência de falsos alarmes. A atribuição de um valor elevado de limiar de deteção reduz a quantidade de falsos alarmes, todavia aumenta a probabilidade de falha na deteção ($1 - p(D)$). Se, pelo contrário, o valor de DT for inferior, o sistema-utilizador originará demasiados falsos alarmes. Há assim a necessidade de um compromisso entre a probabilidade de falha de deteção e de falso alarme (Urlick, 1983, pp. 390-392).

⁵¹ Fonte: Urlick (1983), p. 379.

⁵² As curvas ROC utilizam os princípios de distribuição gaussiana do ruído, para estabelecer uma relação entre o índice de deteção e as probabilidades de falso alarme e de deteção.

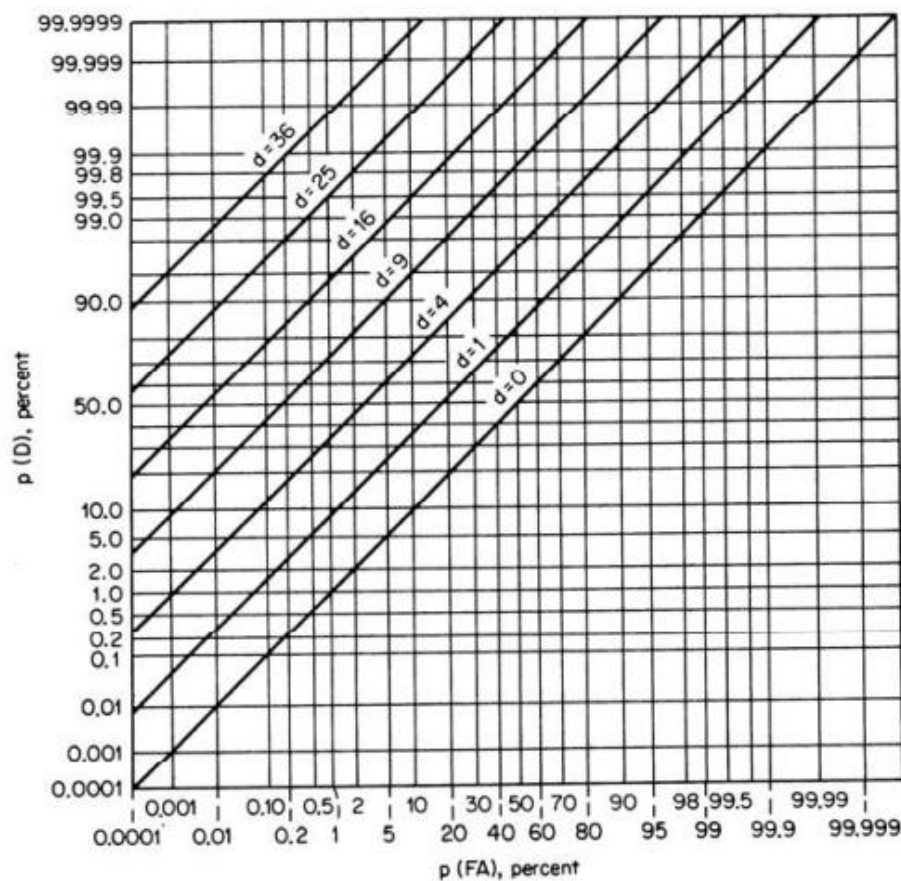


Figura 14: Curvas ROC para determinação do DT, tendo em conta a probabilidade de deteção e falso alarme, em gráfico de coordenadas de probabilidade, para os índices de deteção, d , indicados entre 0 e 36.⁵³

Para o cálculo do DT, conhecido o valor do índice de deteção, existem dois métodos distintos, o primeiro quando o sinal acústico que se pretende detetar é totalmente conhecido, e o segundo aplica-se para um sinal desconhecido num fundo de ruído gaussiano⁵⁴. Para o primeiro método utiliza-se a seguinte expressão⁵⁵, sendo t a duração do sinal e d o índice de deteção.

$$DT = 10 \log \frac{d}{2t}$$

⁵³ Fonte: Urick (1983), p. 383.

⁵⁴ A intensidade do ruído tem uma distribuição gaussiana.

⁵⁵ Fonte: Urick (1983), p. 384.

Se o impulso do sinal for sinusoidal, com intensidade acústica constante na banda de frequências e $w = f_2 - f_1$, pode-se considerar $w = \frac{1}{t}$. A expressão⁵⁶ para o seu cálculo tendo em conta esta simplificação é a seguinte.

$$DT_R = 5 \log \frac{dw}{t}$$

Nela d representa o índice de detecção, e t a duração do sinal acústico em segundos. Também existe uma expressão⁵⁷ equivalente em que é considerado a largura de banda em Hz (w).

$$DT = 5 \log \frac{d w}{t}$$

Quando não é conhecido o sinal e o meio é ruidoso, ou seja, o segundo caso, poderá haver a necessidade de analisar probabilidade de detecção e de falsos alarmes para períodos de tempo maiores que a duração do impulso considerada. Na expressão⁵⁸ seguinte é representado este método de cálculo, em que o período de observação corresponde a T .

$$DT = 5 \log \frac{d w}{t} + \left| 5 \log \frac{T}{t} \right|$$

1.11. Teoria do Traçado de Raios Sonoros

A modelação da acústica submarina, e de todos os fenómenos que lhe estão associados, é fundamental para uma previsão sonar realista. Existem diversos métodos e modelos matemáticos que modelam a propagação, contudo as suas abordagens são bastante distintas; de salientar a teoria de raios, expansão modal e integração de números de onda.

As técnicas de acústica e de traçado de raios baseiam-se na teoria explicativa de que as ondas acústicas se propagam ao longo de raios, sendo estes normais às frentes de onda, que se definem como superfícies de igual fase das ondas acústicas (Hovem, 2013, p. 573).

⁵⁶ Fonte: Urick (1983), p. 395.

⁵⁷ Fonte: Urick (1983), p. 385.

⁵⁸ Fonte: Urick (1983), p. 385.

Quando geradas a partir de uma fonte pontual, em um meio com velocidade de propagação do som constante, as frentes de onda formam superfícies que são círculos concêntricos, e o sinal sonoro propaga-se segundo linhas retas que irradiam da fonte acústica. Se a velocidade do som não for constante, os raios seguem caminhos curvos em vez de retos (Hovem, 2013, p. 573).

A técnica computacional conhecida como o traçado de raios sonoros, ou *raytracing*, é um método usado para calcular as trajetórias dos raios de som a partir da fonte. A teoria dos raios é derivada da equação de onda quando algumas suposições simplificativas são introduzidas e o método é essencialmente uma aproximação (Hovem, 2013, p. 573).

Através desta teoria, é possível calcular a trajetória de cada raio, sendo comum dividir a coluna de água em intervalos de imersão iguais, nos quais se assume que a variação da velocidade de propagação do som é linear com a imersão, resultando a seguinte expressão⁵⁹, na qual $c(z)$ representa a velocidade do som na profundidade z metros.

$$g(z) = \frac{dc(z)}{dz}$$

Se os raios sonoros intercetarem as camadas elementares de espessura dz com uma velocidade diferente, ou seja, se nas duas camadas elementares adjacentes as velocidades do som forem diferentes, estes sofrem refração segundo uma trajetória circular com raio R constante, assumindo que o gradiente vertical da velocidade do som é constante. A circunferência de raio R compreende todas as posições que o raio sonoro percorre ao longo das várias camadas elementares da coluna de água, sendo horizontal na fonte acústica. O raio R só é constante se $g(z) = g$, ou seja, se o gradiente vertical da velocidade de propagação do som for constante. O sinal positivo ou negativo do gradiente determina se o sinal de R é negativo ou positivo e, portanto, determina se o caminho do raio curva para baixo ou para cima. Tal é previsto pela lei de Snell⁶⁰.

$$\frac{\cos\theta_1}{c_1} = \frac{\cos\theta_2}{c_2}$$

Na **Figura 15** está representada a lei de Snell para uma fronteira plana, na qual há alteração da velocidade do som e consequentemente refração do raio sonoro.

⁵⁹ Fonte: Hovem (2013), p. 575.

⁶⁰ Fonte: Urick (1983), p. 127.

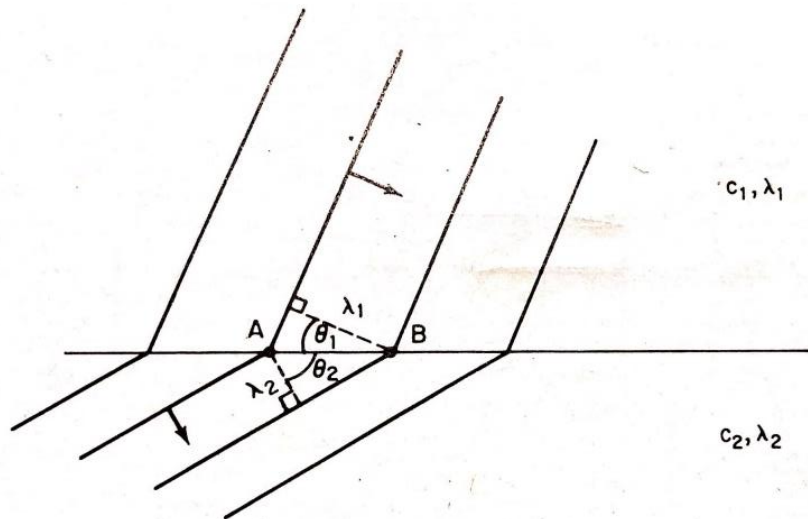


Figura 15: Refração do raio sonoro numa fronteira plana, a separar dois meios com diferentes velocidades do som c_1 e c_2 respetivamente.⁶¹

Se θ for o ângulo entre R na posição inicial (θ_0) e os raios que unem as diversas posições seguintes ocupadas ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_z$), assumindo que junto à fonte acústica o ângulo é nulo ($\theta_0 = 0$), teremos que $\cos \theta_0 = 1$. É, assim, possível simplificar a lei de Snell apresentada anteriormente, resultando a expressão seguinte.

$$\cos \theta(z) = \frac{c(z)}{c_0}$$

O gradiente vertical da velocidade de propagação do som (g) dentro de uma camada elementar da coluna de água é assim linear, e pode ser calculado sabendo a diferença de velocidades entre camadas elementares adjacentes, tal como demonstrado na expressão⁶² seguinte. A determinação da velocidade do som depende da salinidade absoluta, da temperatura conservativa e da pressão.

$$dz = \frac{c(z) - c_0}{g}$$

A definição de salinidade prática foi estabelecida em 1978 pela UNESCO, acompanhada pela respetiva escala denominada *Practical Salinity Scale 1978* (PSS 78), sendo a unidade adimensional para a salinidade a *practical salinity unit* (psu), ou unidade prática de salinidade (ups). É calculada a partir da condutividade da água do mar (tendo como

⁶¹ Fonte: Urick (1983), p. 123.

⁶² Fonte: Urick (1983), p. 124.

referência a condutividade da água a 15°C e 35 psu). As salinidades práticas são as guardadas nas bases de dados. A salinidade absoluta pode ser resumida como a salinidade que tem em conta anomalias de composição química da água do mar por regiões do oceano, relativamente à composição química definida como referência. Com a salinidade prática, latitude, longitude e pressão calcula-se a salinidade absoluta.

A temperatura conservativa é uma propriedade conservativa. A T_c é a entalpia potencial dividida pelo calor específico da água na superfície do mar a pressão constante, $c_{op} = 3991,86 J K g^{-1} K^{-1}$. A diferença entre temperatura potencial e temperatura conservativa pode ser tão grande quanto 0,14°C. A temperatura conservativa é calculada a partir de temperatura *in situ* (a medida e que consta nas bases de dados), da salinidade absoluta e da pressão.

Na **Figura 16** é representado o arco da circunferência de raio R , em função do incremento linear da velocidade do som, bem como as diversas posições ocupadas pelo raio sonoro durante a sua propagação.

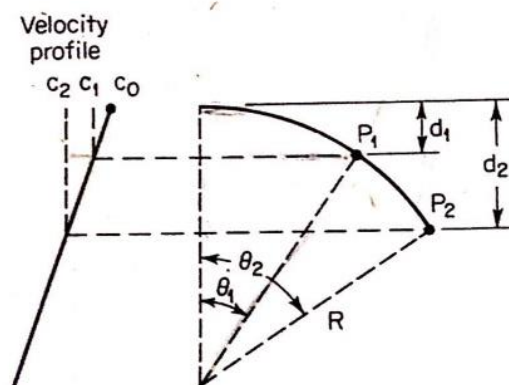


Figura 16: Arco de circunferência que une as diversas posições ocupadas pelo raio sonoro. O raio da circunferência mantém-se constante, devido à linearidade do gradiente vertical da velocidade do som.⁶³

Segundo a lei de Snell e todas as equações dela derivadas, o cálculo de R pode ser simplificado, resultando a seguinte expressão.⁶⁴

$$R = -\frac{c_0}{g}$$

⁶³ Fonte: Urick (1983), p. 124.

⁶⁴ Fonte: Urick (1983), p. 125.

R pode ostentar valores positivos e negativos, dependendo da posição ocupada pelo centro da circunferência, ou seja, é positivo se o centro tiver a sua localização acima da superfície (refração de curvatura côncava para cima), e negativo se for em profundidade (refração de curvatura côncava para baixo).

Os raios sonoros só descrevem arcos de circunferência se o gradiente vertical da velocidade de propagação do som for constante.

Capítulo 2. Desenvolvimento da Ferramenta

A determinação do alcance sonar e de contra deteção são o objetivo primário desta ferramenta operacional. A contra deteção é definida como a distância máxima a que uma plataforma, em modo passivo, consegue detetar a fonte sonora. O alcance sonar é a distância máxima para a qual um alvo submarino é detetado com o sonar a funcionar em modo ativo, dependendo das características técnicas do sistema acústico, das condições meteorológicas e oceanográficas, do navio e do alvo que se pretende detetar.

A transmissão de um sistema acústico a operar em modo ativo é realizada através de impulsos (“pings”); estes podem ser definidos como o impulso transmitido, cuja duração é conhecida. Outra definição, menos aceite, é o tempo total entre transmissões, ou seja, a soma da duração dos impulsos e do período de receção, daí que por vezes este conceito seja algo ambíguo (Hodges, 2010, p. 161).

Assim, para a determinação da previsão sonar é necessário o estudo da influência de todos os fatores mencionados anteriormente no alcance sonar (sonar ativo) e na contra deteção (sonar passivo). Nesse sentido, foi elaborado um programa com a linguagem de programação MATLAB, no qual o utilizador poderá inserir as condições na área de operações, bem como as características do seu equipamento sonar. Os dados de saída deste *software* são a função *raytrace*, os alcances, os perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som, bem como a batimetria⁶⁵ da área de operações e o respectivo perfil batimétrico⁶⁶.

Ao longo deste capítulo serão analisados os processos que permitiram a realização deste *software*, assim como aproximações que foram necessárias para ultrapassar os desafios impostos pela elevada variabilidade que define o oceano, bem como a dificuldade de representar os fenómenos da acústica por simples fórmulas matemáticas, que muitas vezes não representam a complexidade que marca a modelação realista da mesma.

⁶⁵ Para a batimetria foi utilizada a base de dados da *General Bathymetric Charts of the Ocean* (GEBCO), permitindo a entrada na função *raytrace* da profundidade real do fundo do mar, em detrimento de um oceano de fundo plano.

⁶⁶ Define-se como perfil batimétrico as profundidades encontradas ao longo de um azimute, neste caso considera-se que este corresponde ao rumo ao qual o navio navega ou o azimute para onde é emitida a energia acústica, até uma distância definida pelo utilizador do programa, com incrementos de 0,5 milhas náuticas.

Este programa surge no âmbito de outros já existentes para o efeito, nomeadamente o *Lybin 6.0*⁶⁷ e o *Raypath 3.0*⁶⁸, em particular este último utilizado a bordo das fragatas da Marinha Portuguesa, mas cujo processo de previsão sonar é parcialmente ou totalmente desconhecido.

2.1. SeaRider

O SeaRider consiste numa aplicação operacional que resolve a modelação da acústica submarina e a previsão sonar. A existência destes programas é fundamental no combate antissubmarino, assim como no planeamento de operações navais. Como mencionado anteriormente os resultados obtidos são apenas uma aproximação consistente, visto que é impossível representar a variabilidade do oceano e dos fenómenos que no seio deste ocorrem de forma exata e precisa.

Com esta ferramenta computacional procurou-se resolver os problemas apontados pela comunidade operacional, às já existentes para o efeito (*Raypath 3.0* e o FAPSO⁶⁹), contudo o SeaRider foi desenvolvido para que seja possível a sua aplicação no âmbito académico, não sendo necessário a ligação aos sensores de bordo para proceder à utilização da mesma.

Esta dualidade da vertente operacional e da vertente académica, cujas exigências são bastante díspares, levou ao desenvolvimento de duas versões distintas do SeaRider, a primeira com o mesmo nome é destinada ao ensino, que inclui as bases de dados batimétricas GEBCO (*General Bathymetric Charts of the Ocean*) das diversas áreas navegáveis, bem como uma maior configuração pelo operador das condições que se pretende estudar, ficando ao critério do mesmo todos os fatores que são considerados na modelação acústica. A segunda versão de nome “SeaRider_Atlântico_Norte”, destina-se apenas a ser utilizada na área de operações usual da Marinha Portuguesa, nomeadamente o Atlântico Norte, compreendendo toda a ZEE (Zona Económica Exclusiva) portuguesa, sendo certos parâmetros prédefinidos para uma utilização mais fácil e simples pelo operador.

⁶⁷ O *Lybin 6.0* foi desenvolvido pelo *Norwegian Defence Research Establishment* (FFI), em 2011.

⁶⁸ O *Raypath 3.0* foi desenvolvido por Peter Lenk, no Canadá, em 1996.

⁶⁹ O FAPSO (Ferramenta de Apoio à Previsão Sonar Operacional) foi desenvolvido pelo CMG Lopes da Costa, tendo o GMAR Vale Marques criado a variante Delfim, no âmbito da sua dissertação de mestrado para obtenção do grau de Mestre, no ano letivo 2017/2018.

Devido à confidencialidade das características técnicas dos sonares da Marinha Portuguesa, não foi possível prédefinir os campos relativos ao sistema acústico com os valores reais dos mesmos.

O SeaRider foi desenvolvido com recurso à linguagem de programação MATLAB, possuindo dois ficheiros distintos, o código (SeaRider.m) e a sua GUI⁷⁰ (SeaRider.fig), onde se encontram todas as instruções necessárias para realizar os diversos cálculos efetuados para a resolução da previsão sonar. Para auxiliar o operador na utilização desta ferramenta foi criado um manual de utilizador, onde são explicados os diversos menus e submenus existentes, assim como as diversas funcionalidades do mesmo. Este manual pode ser consultado no Apêndice B.

2.2. Base de Dados

Para a resolução da previsão sonar é necessário conhecer os perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som da coluna de água. As sondas XSV e XBT existentes a bordo apresentam um limite operacional, na sua generalidade inferior à profundidade do oceano. Assim, é necessário recorrer a bases de dados climatológicas para completar os perfis recolhidos. Para tal recorreu-se à NOAA (*National Oceanographic and Atmosphere Administration*), entidade que produz, divulga e administra a informação meteorológica e oceanográfica nos EUA, e que disponibiliza gratuitamente a informação de diversos parâmetros de interesse para esta dissertação, à escala mundial, como os perfis já mencionados anteriormente.

A base de dados WOD2018⁷¹ é a versão mais recente disponibilizada pela NOAA, sendo que para a previsão sonar são relevantes as resoluções de um grau e de um quarto de grau (de arco) da longitude e da latitude, ou seja, a grelha espacial tem um espaçamento de malha de um grau quadrado ou de um quarto de grau ao quadrado.

Apesar dos perfis desta última resolução apresentarem um detalhe bastante superior, uma vez que a variabilidade com a latitude e a longitude é melhor representada, em consequência da menor área elementar considerada, a desvantagem da utilização desta reside em um menor volume de dados em profundidade, o que compromete por vezes o

⁷⁰ GUI corresponde a *Graphical User Interface*.

⁷¹ *World Ocean Database* é uma continuação do *Climatological Atlas of the World Ocean* (Levitus, 1982).

rigor da previsão sonar, ou até mesmo a existência de resultados anómalos, além de maior duração das corridas e de requerer computadores de maior capacidade. Assim, por prédefinição a ferramenta opera com a resolução de um grau, podendo o utilizador, se tal pretender, alterar para um quarto de grau.

A NOAA disponibiliza bases de dados que consideram a sazonalidade dos perfis do oceano, sendo possível selecionar a versão anual, as estações (são apenas contemplados o verão e o inverno) ou os meses do ano. Por prédefinição o *software* utiliza a escala anual (climatologias das médias das últimas seis a sete décadas), devido a um maior volume de dados disponível para essa versão.

A transferência das bases de dados (temperatura e salinidade) foi realizada através do portal *internet* existente para o efeito da WOA (*World Ocean Atlas*)⁷² 2018, sendo o formato selecionado o .csv (*comma separated values*).

De salientar que na ferramenta o utilizador poderá selecionar se pretende utilizar as bases de dados climatológicas ou os dados das sondas XBT (sigla em inglês para *eXpendable BathyThermograph profiler*) e XSV (sigla em inglês para *eXpendable Sound Velocity profiler*), cuja falta de dados é suprimida recorrendo à climatologia, visto que abaixo da camada de mistura⁷³ e da termoclina sazonal as variações da temperatura e salinidade não são significativas, sendo assim uma aproximação aceitável, visto que não introduz erros aos cálculos efetuados.

2.3. Inclusão de XBT e XSV

Como explicado no subcapítulo anterior a possibilidade de incorporar bases de dados climatológicas, para a obtenção de perfis de temperatura e salinidade, cujos valores permitem o cálculo da velocidade do som, é uma potencialidade importante e também referida pela comunidade operacional, visto que permite obter valores de temperatura e de salinidade para toda a coluna de água, e não apenas até ao limite operacional da sonda existente a bordo.

⁷² <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/woa13data.html>, consultado a última vez em 14 de abril de 2019.

⁷³ Define-se por camada de mistura a camada superficial na qual ocorre homogeneização da temperatura e salinidade por ação do vento e das vagas, cuja espessura varia ao longo do ano. A espessura é máxima no inverno, período durante o qual pode atingir os 100 ou mais metros devido à maior agitação marítima e às menores temperaturas superficiais, e mínima no verão.

Existem publicações, utilizadas a bordo das unidades navais, que também permitem completar os dados das colunas de água; contudo, encontram-se desatualizadas e os valores de temperatura e salinidade já não correspondem aos atuais, afetando os valores de previsão sonar.

As sondas usualmente utilizadas são as XBT, que medem a temperatura para as diversas profundidades até ao seu limite operacional, sendo posteriormente estes dados utilizados para o cálculo da velocidade do som. De referir que as variações de salinidade são neste caso desprezadas, visto que este parâmetro assume uma pequena influência na determinação da velocidade do som. Na **Figura 17** estão representados os perfis de temperatura conservativa, salinidade absoluta e velocidade do som resultantes da aplicação dos perfis XBT.

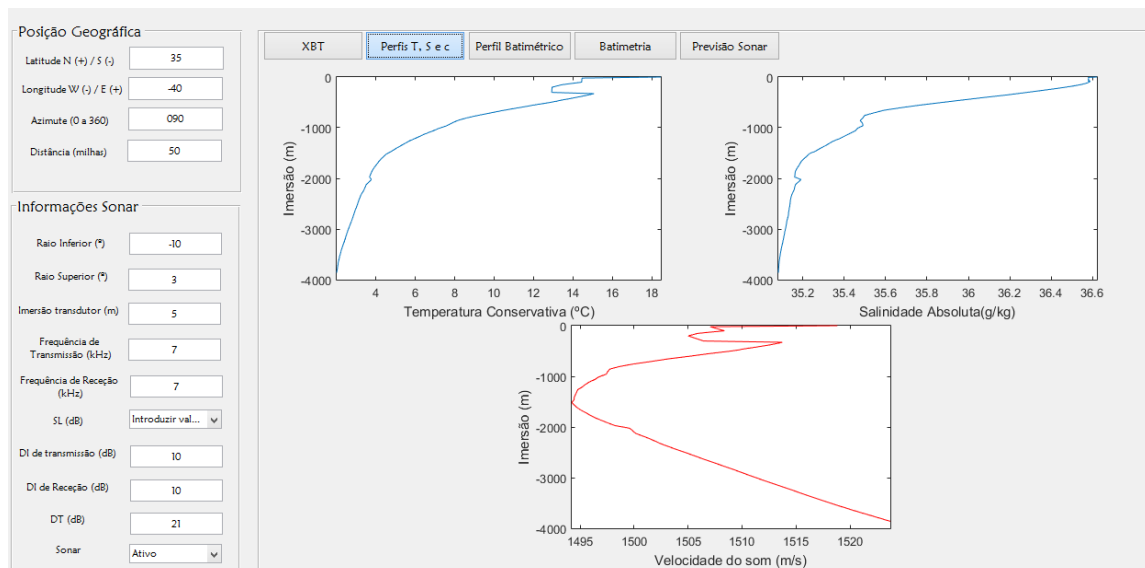


Figura 17: Perfis de temperatura conservativa ($^{\circ}\text{C}$), salinidade absoluta (g/kg) e ainda o perfil calculado da velocidade do som (m/s) resultante dos valores de temperatura do perfil XBT da **Figura 18** completados pelos perfis climatológicos da **Figura 19**.

O *software* permite ao utilizador introduzir os perfis de temperatura ou de velocidade do som até aos 300 metros, para imersões de 5 em 5 metros, até aos 100 metros e, de 25 em 25 metros, até aos 300 metros por prédefinição. Na **Figura 18** está representado o *layout* para a escolha da fonte de perfis, bem como as tabelas XSV e XBT.

O programa consegue determinar qual a profundidade máxima introduzida pelo utilizador ou dos próprios ficheiros selecionados, completando os perfis por extrapolação,

com os dados da climatologia selecionada pelo operador, não havendo o problema da existência de limitações operacionais das sondas.

The interface shows a tabbed menu at the top with 'XBT' selected. Below it, on the left, are radio buttons for 'Tipos de Dados': XBT, XSV, 'Ficheiro BT' (selected), 'Ficheiro CTD', and 'Climatologia'. Below these is a text field for 'Nome do Ficheiro' containing '025655_2018-10-20_08-43-42_proc.csv'. On the right, there are two tables:

	Profundidade	Temperatura
1	0	18.5000
2	5	17.5000
3	10	16.5000
4	15	15.5000
5	20	14.5000
6	25	14.5000
7	30	14.5000
8	35	14.5000
9	40	14.5000
10	45	14.5000
11	50	14.5000
12	55	14.5000
13	60	14.5000
14	65	14.5000
15	70	14.5000
16	75	14.5000
17	80	14.5000
18	85	14.5000
19	90	14.5000
20	95	14.5000
21	100	14.5000
22	125	14
23	150	13.5000
24	175	13.2500
25	200	13
26	225	13
27	250	13

	Profundidade	Velocidade do Som
1	0	1500
2	5	1500
3	10	1500
4	15	1500
5	20	1500
6	25	1499
7	30	1498
8	35	1497
9	40	1497
10	45	1496
11	50	1496
12	55	1495
13	60	1494
14	65	1493
15	70	1493
16	75	1492
17	80	1492
18	85	1492
19	90	1492
20	95	1491
21	100	1491
22	125	1490
23	150	1488
24	175	1486
25	200	1485
26	225	1485
27	250	1484

Figura 18: *Layout* da ferramenta operacional SeaRider para a seleção da fonte de dados pretendida pelo utilizador e tabelas XSV e XBT com valores prédefinidos de perfis de velocidade do som e de temperatura.

A introdução manual dos perfis, nas tabelas, é um processo moroso e sujeito a erros, que podem comprometer a previsão sonar realizada. A valência de introdução de ficheiros BT (sigla em inglês para *BathyThermograph*) e CTD (sigla em inglês para o sensor *Conductivity, Temperature and Depth*) permite aumentar a rapidez da previsão, necessária em operações navais para delinear táticas em operações ou exercícios ASW (sigla em inglês para *Anti-Submarine Warfare*), sendo de facto uma das sugestões da comunidade submarina.

Apesar de melhorar a previsão sonar, a WOD2018 não representa de modo rigoroso a realidade encontrada, sobretudo na camada mais superficial, no momento em que se efetua a previsão sonar, visto que esta resulta de uma média das medições realizadas, não sendo considerada a variabilidade que caracteriza o oceano, sobretudo na superfície e próximo desta. Deve-se, assim, optar pelos perfis das sondas, pelo menos até à base da termoclina sazonal, sempre que a sua utilização seja possível, para melhorar os valores do alcance sonar e da contra deteção. Na **Figura 19** mostram-se exemplos de perfis climatológicos obtidos pela aplicação dessas bases de dados.

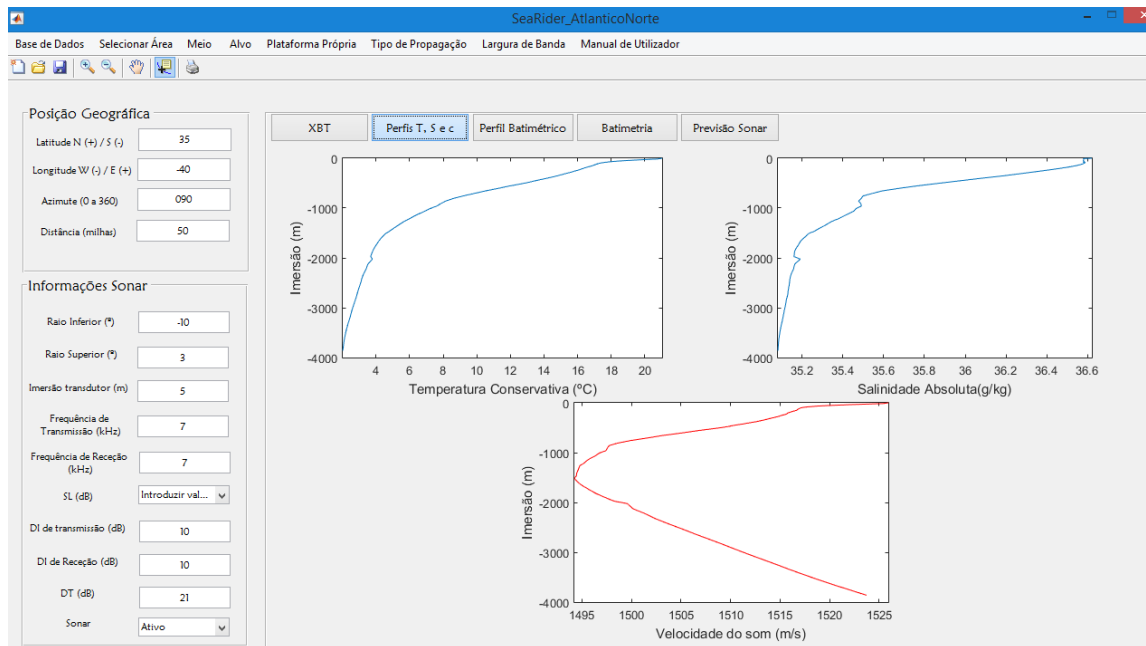


Figura 19: Perfis climatológicos resultantes da aplicação da base de dados anual, com 1° de resolução espacial, para a posição latitude 35,0° N e longitude 40,0° W.

Através da análise da **Figura 17** e da **Figura 19**, é possível concluir que nos dados retirados das sondas, a variabilidade dos valores, em profundidade, é melhor representada, verificando-se variações bruscas características da camada superficial, enquanto nos perfis climatológicos a variação é próxima da linear.

2.4. Bases de Dados Batimétricos GEBCO

Para a resolução da previsão sonar é relevante a existência de bases de dados batimétricos, que permitam o conhecimento da profundidade para as diversas posições geográficas. Para tal, utilizou-se as disponibilizadas pela GEBCO (*General Bathymetric Charts of the Ocean*), sendo nesta ferramenta utilizada a versão 2014.

No portal *internet* existente para o seu *download*⁷⁴ é possível seleccionar a área de interesse no mapa mundo. Na versão académica desta ferramenta, encontram-se disponíveis as seguintes áreas geográficas: Atlântico Norte, Atlântico Sul, Oceano Índico, Oceano Pacífico Leste, Oceano Pacífico Oeste, Mar Mediterrâneo, Mar do Norte e ZZE de Portugal.

⁷⁴ Disponível em https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/. Consultado pela última vez em 14 de abril de 2019.

A utilização destes dados é fundamental para a resolução da função *raytracing*, na qual são calculadas as coordenadas (verticais e horizontais) de interação com o fundo do mar e com a superfície. Sem a utilização destas bases de dados seria necessário considerar, como aproximação ou simplificação, o oceano de fundo plano, o que iria introduzir inconsistências na determinação da previsão sonar. O conhecimento destas coordenadas de interação com o fundo, com os valores reais de profundidade, permite um cálculo mais rigoroso do número de interações de cada raio emitido com o fundo, e consequentemente as perdas de fundo e reverberações nele originadas.

Paralelamente, a utilização das bases de dados permite adicionar duas funcionalidades ao programa, nomeadamente a representação de um mapa batimétrico e o do perfil batimétrico, considerando um determinado azimuth (que será coincidente com o rumo ao qual o navio navega ou o azimuth da projeção da energia, consoante a escolha do utilizador) e incremento de distância, que nesta ferramenta foi prédefinida como 0,5 milhas náuticas. Na **Figura 20** está representado o mapa batimétrico obtido no SeaRider, com recurso às bases de dados da GEBCO.

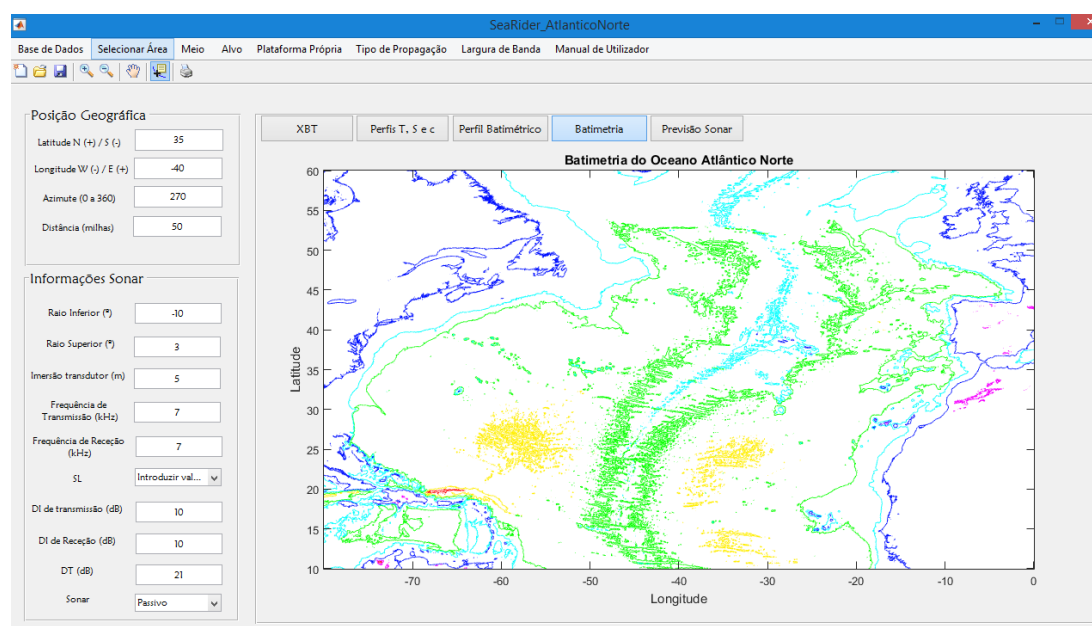


Figura 20: Mapa batimétrico do Atlântico Norte, obtido com recurso às bases de dados da GEBCO.

2.5. Perfil Batimétrico

Para a utilização da função *raytracing* é necessário conhecer o perfil batimétrico da área de operações, sobretudo no azimuth correspondente ao rumo ao qual o navio navega,

para que a determinação das coordenadas horizontais e verticais do trajeto percorrido pelos diversos raios sejam calculadas com precisão. É destas coordenadas que dependem os cálculos de reverberação e perdas com fundo e/ou superfície, que influenciam a previsão sonar.

Assim, para resolver o transporte de coordenadas geodésicas recorreu-se aos cálculos de geodesia no elipsóide, tendo como dados de entrada a posição geográfica (latitude e longitude), azimute e distância, tal como apresentado na **Figura 21**.

Figura 21: Painel de introdução de dados para a resolução do transporte de coordenadas geodésicas.

De seguida serão listadas todas as fórmulas⁷⁵ necessárias para a resolução deste problema. De salientar que estas expressões apenas são aplicáveis até distâncias da ordem dos 80 km, o que não implica limitações visto que no contexto desta dissertação não se consideram os trajetos dos raios sonoros para além dessa distância.

$$\Delta\varphi'' = -s \cos(\alpha) * B - s^2 \sin^2(\alpha) * D + h \sin^2(\alpha) * E$$

$$\log\Delta\lambda'' = \log s + \log \sin(\alpha) + \log A' + \log \sec(\varphi') + \text{correção}$$

$$\Delta\alpha'' = -\Delta\lambda'' * \sin\left(\frac{\varphi + \varphi'}{2}\right) * \sec\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) - (\Delta\lambda'')^3 * F$$

$$\delta\varphi = -s \cos(\alpha) * B - s^2 \sin^2(\alpha) * C$$

$$h = -s \cos(\alpha) * B$$

$$A = \frac{1}{N \sin(1'')}$$

⁷⁵ Fonte: Manual de Hidrografia (J.A.B. Fernandes, 1967), pp. 23-26.

$$B = \frac{1}{R \operatorname{sen}(1'')}$$

$$C = \frac{\operatorname{tg}(\varphi)}{2RN \operatorname{sen}(1'')}$$

$$D = \frac{3e^2 * \operatorname{sen}(\varphi) * \cos(\varphi) * \operatorname{sen}(1'')}{2(1 - e^2 * \operatorname{sen}^2(\varphi))}$$

$$E = \frac{1 + 3\operatorname{tg}^2(\varphi)}{6N^2}$$

$$F = \frac{1}{12} \operatorname{sen}\left(\frac{\varphi + \varphi'}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\varphi + \varphi'}{2}\right) * \operatorname{sen}^2(1'')$$

$$R = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \varphi_1)^{3/2}}$$

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \varphi_1)^{1/2}}$$

$$N' = \frac{a}{(1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \varphi_2)^{1/2}}$$

$$A' = \frac{1}{N' \operatorname{sen} 1''}$$

Por uma questão de convenção, na introdução dos dados o operador deve introduzir as latitudes e longitudes com os sinais indicados (positivas para N e E, e negativas para S e W), para que o transporte de coordenadas geodésicas possa ser aplicado ao longo da geodésica, a incrementos de distância regulares. Da aplicação destas para a posição, distância e azimute na **Figura 21**, resulta o perfil batimétrico da **Figura 22**.

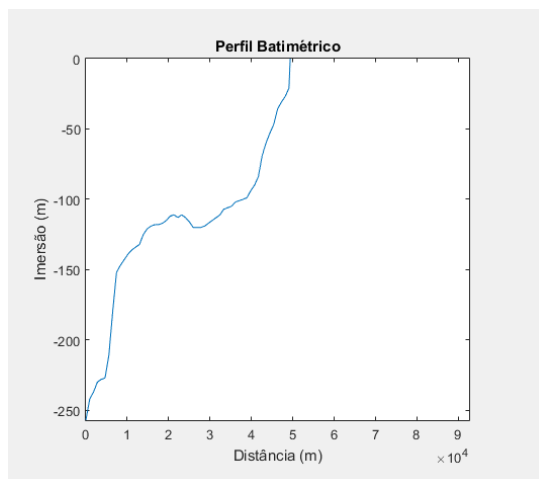


Figura 22: Perfil batimétrico obtido através da aplicação dos cálculos de geodesia no elipsoide do Manual de Hidrografia (J.A.B. Fernandes, 1967).

2.6. Função *Raytrace*

Para a modelação da acústica submarina é necessário a aplicação de uma teoria de traçado dos raios sonoros (subcapítulo 1.11 desta dissertação), sendo nesta ferramenta utilizada a *raytracing*. Não se encontrando outras versões livres disponíveis para utilização, foi adotado o algoritmo, escrito em linguagem MATLAB (função “raytrace.m”), de Val Schmidt⁷⁶ (embora não publicado em artigo referenciado, é datado de 2009), da Universidade de New Brunswick. Essa função usa o perfil da velocidade da propagação do som para o local. Como argumentos de entrada recebe: origem das coordenadas horizontais e verticais (m) do início da propagação (projeto), ângulo *grazing* (em graus relativos à horizontal) no início da propagação, tempo máximo (s) para a propagação, coordenadas verticais (m) e velocidades do som (m/s) do perfil vertical.

Como saídas proporciona: coordenadas horizontais e verticais (m) dos pontos de controlo das trajetórias dos raios, tempos de propagação e distâncias desde o transdutor até esses pontos das trajetórias. Basicamente utiliza a lei de Snell na refração dos raios em propagação num meio onde a velocidade do som varia na vertical. Proporciona reflexão dos raios no fundo (assumido plano) e na superfície. Neste modelo as variações verticais da velocidade do som são aproximadas por gradientes lineares por partes (no caso camadas, de metro a metro de imersão). Com isto os raios sonoros propagam-se em cada uma dessas

⁷⁶ Disponível em <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26253-raytrace>. Consultado pela última vez em 14 de abril de 2019.

camadas segundo um arco de circunferência de raio $R = -\frac{1}{g} \frac{c}{\cos \theta}$, onde g é o gradiente vertical da velocidade do som na camada, c a velocidade do som na entrada da camada e θ o ângulo *grazing* (relativo à horizontal) do raio sonoro à entrada da camada. Detalhes sobre a forma de integrar numericamente podem ser consultados ao longo do código, bem documentado na própria função (esta facilmente descarregada do *link* em nota de rodapé 79).

No gráfico da Figura 23 é possível ver o trajeto dos raios sonoros utilizando este algoritmo.

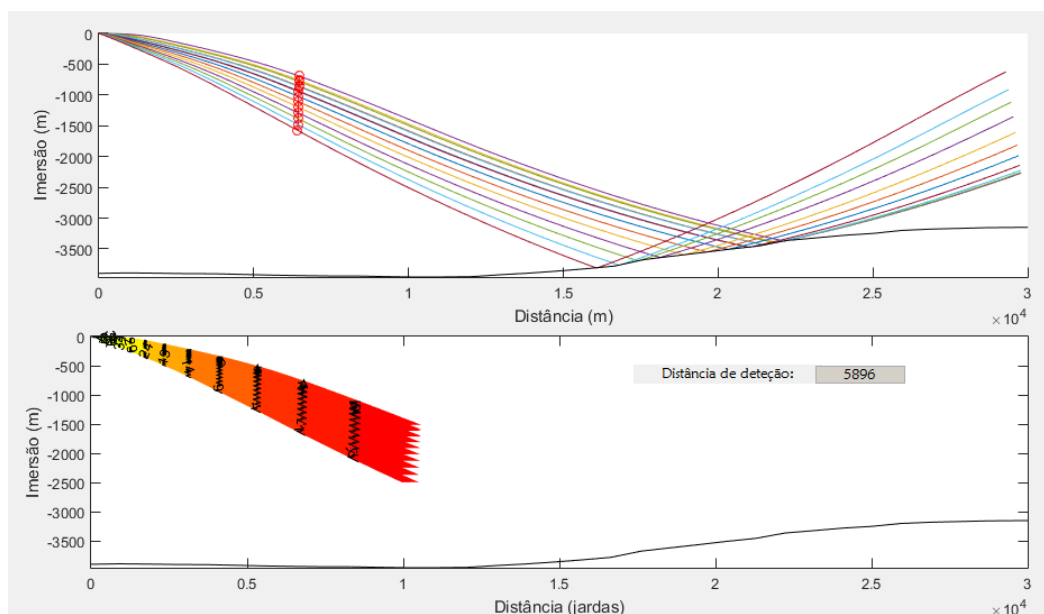


Figura 23: Determinação dos trajetos percorridos por raios sonoros, utilizando o algoritmo de Val Schmidt.

2.7. Funções TEOS-10

Como referido no subcapítulo anterior, o algoritmo de Val Schmidt da função *raytrace* tem como entrada o perfil da velocidade do som da coluna de água em estudo. Contudo, não existem bases de dados para este parâmetro, sendo determinado através dos vetores de salinidade e temperatura obtidos recorrendo à climatologia WOD2018 da NOAA, sendo utilizadas para os cálculos as funções TEOS-10⁷⁷.

⁷⁷ *Thermodynamic and Equation of State of Seawater* adotada pela Comissão Oceanográfica Intergovernamental em 2010.

A TEOS-10 baseia-se na formulação da função Gibbs, a partir da qual todas as propriedades termodinâmicas da água do mar (densidade, entalpia, velocidade do som de entropia, etc.) podem ser derivadas de uma maneira termodinâmica consistente. São disponibilizadas na *Gibbs-SeaWater* (GSW) *Oceanographic Toolbox*, existindo a versão compatível com a linguagem MATLAB, o que permitiu a utilização dessas funções nesta ferramenta operacional.

Esta convenção surgiu no âmbito de substituir a EOS-80⁷⁸, cuja principal distinção deve-se às funções atualmente em vigor (TEOS-10) utilizarem a salinidade absoluta (fração mássica de sal na água do mar, tendo em conta a diversidade regional e em profundidade da sua composição química) em oposição às unidades práticas de salinidade (que é essencialmente uma medida da condutividade da água do mar à temperatura de 15° C e pressão de 0 dbar) para descrever o teor de sal da água do mar. Assim, a salinidade tem como unidade adimensional a relação g/kg. Tal permite o cálculo das propriedades necessárias para obter a velocidade de som com maior exatidão e no padrão em vigor.

Contudo, para a utilização das funções da GSW é necessário converter as unidades dos dados de temperatura *in situ* (em °C) e de salinidade prática (em ups), ambas retiradas da climatologia da NOAA, respetivamente para temperatura conservativa (em °C) e para salinidade absoluta (g/kg); outra conversão necessária foi realizada nas unidades de profundidade, que foi convertida de imersões em metros para pressões em dbar.

Para a determinação da velocidade do som foi necessário a criação de uma matriz inicial com valores de profundidade prédefinidos, correspondentes às imersões para as quais a NOAA disponibiliza os dados da temperatura e salinidade, ou seja, da superfície aos 100 metros, por incrementos de 5 metros, dos 100 aos 500 metros, em incrementos de 25 metros, dos 500 aos 2.000 metros em incrementos de 50 metros, e dos 2.000 aos 5.500 metros, em incrementos de 100 metros.

Como já referido, foi necessário converter os valores de imersão em pressão, tendo sido utilizada para o efeito a função *gsw_p_from_z*. Para a conversão da salinidade prática para a salinidade absoluta, foi utilizada a função da GSW *gsw_SA_from_SP*, entrando com as coordenadas geográficas e a pressão. De modo análogo, para converter a temperatura *in situ* da NOAA em temperatura conservativa foi utilizada a função *gsw_CT_from_t*, entrando

⁷⁸ *Equation of State of Seawater* adotada pela Comissão Oceanográfica Intergovernamental na década de 1980.

com pressões, temperaturas conservativas e salinidades absolutas. Finalmente, com as unidades de acordo com a convenção em vigor, foi possível o cálculo da velocidade do som, sendo apenas necessário a aplicação da função *gsw_sound_speed*, entrando com pressões, temperaturas conservativas e salinidades absolutas.

A fórmula geral para o cálculo da velocidade do som, $c = c(S_A, T, p) = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} | S_A, \eta\right)^{0.5}$ (onde p para pressão, ρ para densidade, T para temperatura, S_A para salinidade absoluta e η para entropia específica), é equação diferencial cujo desenvolvimento pode ser consultado no manual da “*The international thermodynamic equation of seawater – 2010: calculation and use of thermodynamic properties*”, secção 2.17, p. 22, que remete os detalhes para as bibliotecas de *software*, apresentadas nos apêndices M e N desse manual.

2.8. Cálculo de Distâncias Percorridas por cada Raio Sonoro

Para o cálculo das perdas de transmissão, sejam estas por dispersão ou absorção, é necessário conhecer a distância percorrida pelos diversos raios, ao longo dos chamados pontos de controlo da função *raytrace*, mais concretamente entre as diversas coordenadas horizontais e verticais que constituem os dados de saída do algoritmo utilizado.

Na realidade a função *raytrace* de Val Schmidt determina o vetor das distâncias percorridas, pelos diversos raios selecionados pelo utilizador, entre o raio inferior e o superior introduzidos, a incrementos de 1° . Porém, este apenas fornece o alcance, ou seja, a distância máxima que esses raios atingem e não a distância desde a origem aos diversos pontos de controlo.

Para resolver esta questão utilizou-se o conhecido teorema de Pitágoras, que apesar de apenas se aplicar a triângulos retângulos, em que um dos ângulos é obrigatoriamente reto, é uma aproximação aceitável na determinação das distâncias percorridas pelos raios sonoros, visto que, apesar de estes não se propagarem segundo retas, como a variação de coordenadas horizontais e verticais entre pontos de controlo é bastante reduzida, pode-se considerar que, entre essas coordenadas, o raio propaga-se segundo retas. Na **Figura 24** aplicou-se sobre a função *raytrace* um triângulo retângulo, neste caso com dimensões exageradas para que se possa visualizar que é possível aplicar esta aproximação.

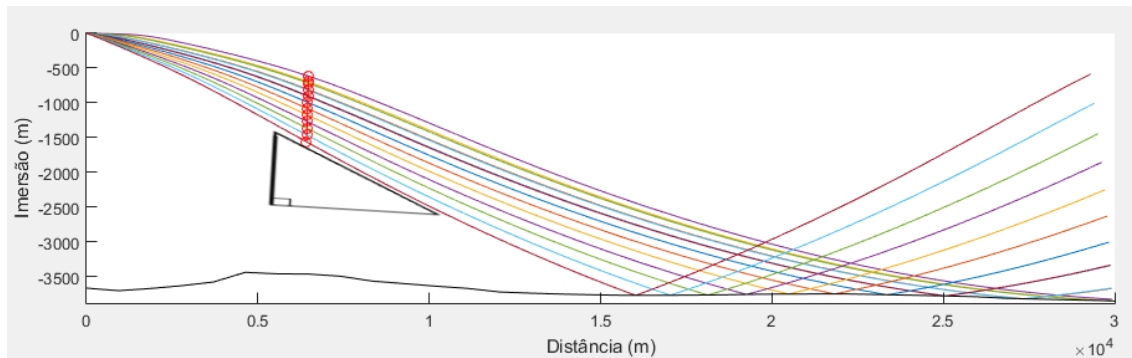


Figura 24: Aplicação do teorema de Pitágoras para a determinação das distâncias, percorridas pelos diversos raios acústicos, entre pontos de controlo.

Pela aplicação deste teorema, é conhecido o vetor de distâncias entre pontos de controlo e acumuladas ao longo dos trajetos, podendo ser empregue diretamente no cálculo das referidas perdas de transmissão, que irão ser estudadas com detalhe mais à frente.

2.9. Interações dos Raios Sonoros com a Superfície e o Fundo

A função *raytrace* resolve as reflexões que ocorrem no fundo e na superfície, precisando, para tal, do perfil da velocidade do som, para aplicação da lei de Snell. Para que este perfil seja um dado de entrada da referida função, é necessário que este surja como vetor em que o primeiro valor corresponde à superfície e o último à profundidade no local.

Dado que a batimetria e os perfis têm a sua origem em bases de dados distintas, poderá acontecer que os valores dos perfis disponibilizados pela NOAA possuam profundidades inferiores à real, em consequência de ainda não terem sido efetuadas medições da temperatura e salinidade, para todas as posições geográficas até ao fundo do mar, não sendo uma base de dados totalmente completa. Assim, é feita uma extrapolação do vetor da velocidade do som pela ferramenta operacional SeaRider, para que sejam conhecidos valores para todas as profundidades, e consequentemente resolver as propagações e reflexões no fundo.

As interações com a superfície e com o fundo também geram outros fenómenos acústicos, denominados de espalhamento ou *scattering* do som e reverberação, sendo este último fenómeno abordado no subcapítulo **2.14. Nível de Reverberação**. Estes dependem do tipo ou natureza do fundo do mar encontrado no local, sendo também um dado de entrada introduzido pelo operador do programa. Por vezes a natureza do fundo é indicada nas cartas náuticas, sobretudo nas zonas costeiras. Em geral para o alto mar não é

conhecida a natureza do fundo, apenas constando de bases de dados classificadas, sem acesso público.

Para as perdas de espalhamento foram utilizados valores de referência⁷⁹ correspondentes aos que se encontram na **Tabela 4**, sendo considerados diversos tipos de fundos que poderão ser selecionados pelo operador da ferramenta. A desvantagem desta abordagem é não serem considerados o ângulo de incidência, o relevo do fundo ou até mesmo a rugosidade deste. A Marinha nos guias de previsão sonar apresenta valores de referência para utilização, no entanto, devido a serem confidenciais, não são apresentados nesta dissertação.

<i>Tipo de Fundo</i>	<i>Perdas por Espalhamento (dB)</i>
Areia fina	3
Rocha	4
Areia com rocha	6
Areia grossa	8
Lodo	14

Tabela 4: Valores de referência para as perdas por espalhamento dependendo do tipo de fundo.

Para as perdas por espalhamento, na superfície do mar, não existem valores de referência como no caso anterior, contudo estas dependem diretamente do estado do mar e da frequência de operação do transdutor, sendo assim possível calcular as mesmas perdas.

Na **Tabela 5** estão definidas as alturas da vaga e as velocidades do vento associadas a cada estado do mar, de acordo com a escala da Organização Meteorológica Mundial.

⁷⁹ Fonte: Urick (1983), p. 143. Na tabela 5.5 foram selecionados os valores de frequência correspondentes a 7,5 kHz, para ângulo de incidência normal.

<i><u>Estado do Mar</u></i>	<i><u>Altura da Vaga (m)</u></i>	<i><u>Velocidade do Vento (nós)</u></i>
0	0	1,5
1/2	0,1	3,5
1	0,15	5
2	0,46	8,5
3	0,91	13,5
4	1,8	19
5	3,2	24,5
6	5	37,5
7	7,6	51,5
8	11,4	59,5
9	13,7	64

Tabela 5: Estados do mar (escala da Organização Meteorológica Mundial) e correspondentes alturas de vaga e velocidades do vento, utilizadas para o cálculo das perdas de superfície por espalhamento.

Para o cálculo das perdas de superfície (SSL, na sigla em inglês para *Sea Surface Loss*) é utilizada a fórmula⁸⁰ apresentada de seguida. Na qual SS representa o estado mar na área de operações e f a frequência de operação do sistema acústico utilizado, com f em kHz.

$$SSL = SS * \sqrt{f}$$

2.10. Cálculo do Ruído Ambiente Espectral

Devido à elevada variabilidade temporal e espacial, que caracteriza o oceano-atmosfera, a atribuição de um valor ao ruído ambiente consiste apenas em uma

⁸⁰ Fonte: Kinsler (1982), p. 405.

aproximação, que se pretende que represente, de modo realista, as diversas fontes de ruído encontradas no ambiente submarino. Para tal foram testados dois métodos distintos: no primeiro utiliza-se a interpolação e extrapolação de dados e, no segundo, o método dos mínimos quadrados.

2.10.1. Interpolação e Extrapolação

Através dos dados retirados dos gráficos de Urick 1984 (Figura 2-10, p. 2-20), Urick 1983 (Figura 7.5, p. 210), Kinsler *et al.* (1982, Figura 55.8, p. 413) e Waite (2002, Figura 5.3, p. 88), foi aplicada uma interpolação e/ou extrapolação dos valores disponibilizados pelos mesmos para o estado do mar, precipitação e tráfego marítimo, para o espectro de frequências entre os 100 Hz e os 10 kHz.

É chamado de interpolação, o método que permite obter um novo conjunto de dados a partir de um conjunto discreto de valores previamente conhecidos. Extrapolação é o processo de estimar o valor de uma variável com base na sua relação com outra variável, além do intervalo de observação original, o que permite fazer uma previsão do ruído para os estados do mar 7, 8 e 9, além dos dados dos estados de mar de base conhecidos.

Tal foi conseguido, através da leitura do nível de ruído espectral, para as várias frequências, cujos dados estão disponíveis, sendo necessário realizar este processo para as quatro fontes mencionadas. Uma limitação destes gráficos é que existem apenas curvas para determinados estados do mar (SS) ou velocidades do vento, o que tornaria pouco prático ao operador da ferramenta selecionar as condições METOC existentes.

Para resolver este problema foi utilizada a interpolação ou extrapolação de valores conhecidos. Para este propósito, foi criada uma tabela para cada gráfico utilizado, onde o valor de dB do ruído ambiente espectral foi inserido, para cada frequência e estado do mar conhecido. Para as curvas em falta, considerou-se que a variação entre cada uma seria a mesma (variação linear) para SS próximos, e assim as tabelas foram completadas. Deste processo resultou o gráfico da **Figura 25**.

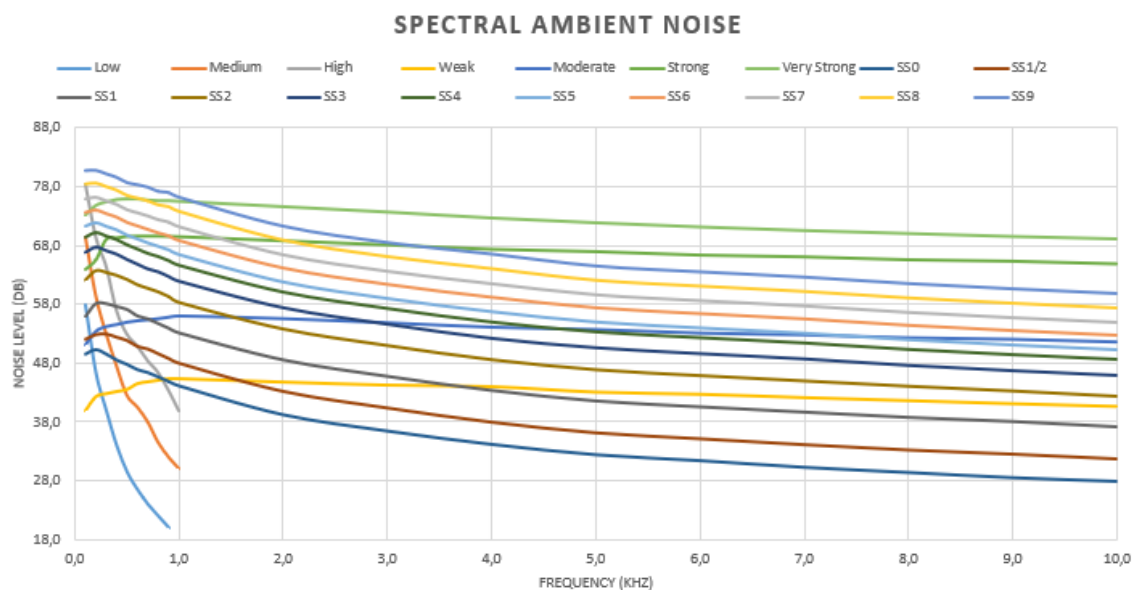


Figura 25: Ruído ambiente espectral, resultante da aplicação de interpolações e/ou extrapolações de valores conhecidos.⁸¹

2.10.2. Método dos Mínimos Quadrados

O método mencionado, no subcapítulo anterior, está sujeito a diversos erros, quer pela possibilidade de má interpretação dos gráficos e à não utilização de dados discretos, quer pelos métodos de interpolação e extrapolação por serem afetados por erros. Assim, outro método, designado de mínimos quadrados foi empregue. Partindo de dados discretos (em determinadas frequências), foram calculadas determinadas funções que se ajustam aos dados discretos existentes, tendo estas como variável independente a frequência de operação do sonar. Ou seja, a regressão permite determinar a relação entre diversas variáveis dependentes e uma variável independente, enquanto a interpolação/extrapolação permite apenas estimar valores.

Para a recolha de dados utilizou-se o livro de Hodges (2010), "Underwater Acoustics", no qual existem três tabelas distintas para o ruído ambiente, tendo em conta a fonte sonora em estudo: tráfego de navios (tabela 7.1, p. 132), precipitação (tabela 7.3, p. 136) e estado do mar ou velocidade do vento (tabela 7.2, p. 134). As tabelas fornecem para frequências específicas os níveis de espectro de ruído ambiente correspondentes. Como apenas uma banda específica do espectro é necessária para a operação dos sonares, apenas

⁸¹ Fonte: C. Torres e C. Costa (2019), *Underwater Ambient Noise – An Estimation Methodology*, p. 4, publicado e apresentado na Conferência Inter-Noise, Madrid, 16-19 de junho de 2019.

os valores de interesse para o âmbito da dissertação (de 0,1 kHz a 10 kHz) foram recolhidos.

Apesar destes valores serem tabelados (e não lidos de gráficos), sendo menos sujeitos a erros, pretende-se que o utilizador use o valor de frequência do transdutor e não uma aproximação, daí ser necessário criar funções com recurso ao método de ajuste por mínimos quadrados. No entanto, no caso do estado do mar ou velocidade do vento, Hodges (2010) não apresenta dados para todas as condições possíveis, e por isso, um processo de interpolação e extrapolação foi aplicado aos valores existentes, semelhante ao explicado no subcapítulo anterior.

O ajuste de funções requer um modelo paramétrico que relacione os dados de resposta aos dados que se pretendem estimar com um ou mais coeficientes, neste caso com quatro coeficientes, visto que será utilizado um polinómio de terceiro grau, foi adotado este grau pelo compromisso entre a complexidade dos cálculos e o rigor que este oferece. O resultado do processo de adaptação é uma estimativa.

Para obter as estimativas dos coeficientes, o método dos mínimos quadrados minimiza o quadrado da soma dos resíduos. O resíduo para o conjunto de dados em estudo é definido como a diferença entre o valor da resposta observada e o valor de resposta ajustado e é identificado como o erro associado aos dados, que corresponde à diferença entre os dados apresentados por Hodges (2010) e os obtidos pela aproximação de um polinómio de terceiro grau para esses valores.

Basicamente, o polinómio que queremos obter é o seguinte, no qual f significa frequência:

$$y = a_0 + a_1f + a_2f^2 + a_3f^3$$

Colocando este problema na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f_1 & f_1^2 & f_1^3 \\ 1 & f_2 & f_2^2 & f_2^3 \\ 1 & f_3 & f_3^2 & f_3^3 \\ 1 & f_4 & f_4^2 & f_4^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}$$

Na matriz apresentada anteriormente, temos $[a]$ como o vetor dos coeficientes do polinómio de terceiro grau que se pretende obter, $[F]$ é a matriz que tem como linhas as frequências para as quais os valores de ruído ambiente são conhecidos e, como colunas, as

frequências elevadas aos expoentes do polinómio, ou seja 0, 1, 2 e 3; $[\mathbf{Y}]$ é o vetor com valores de ruído ambiente, cuja unidade de medida é o decibel. Para resolver este problema, é necessário transpor a matriz $[\mathbf{F}]$.

$$\mathbf{F}^T \mathbf{y} = \mathbf{F}^T \mathbf{F} \mathbf{a}$$

Isolando o vetor $[\mathbf{a}]$, que corresponde aos coeficientes que se pretende obter e consequentemente as incógnitas, resolve-se este problema.

$$\mathbf{a} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{y}$$

O resíduo, que representa o erro associado à solução, deve ser sempre calculado para que seja possível determinar se a solução encontrada é válida. Dado que R^2 depende da quantidade de dados, não permite avaliar a qualidade do modelo de forma independente do número de pontos.

$$R^2 = \sum_{i=1}^4 [y_i - (a_0 + a_1 f + a_2 f^2 + a_3 f^3)]^2$$

Após ser aplicado este método a todas as condições METOC, passíveis de ser encontradas no mar, sejam estas relativas ao estado do mar, precipitação ou tráfego marítimo, foram calculadas as funções que as representam tendo sido desenvolvido um pequeno programa para auxílio destes cálculos.

Com essas funções que foram introduzidas no *software* principal de previsão sonar, o operador do mesmo é capaz de selecionar as condições atuais, sem a necessidade de as aproximar, reduzindo os erros a que a modelação acústica está sujeita. Na **Figura 26** são apresentadas as funções obtidas em gráfico.

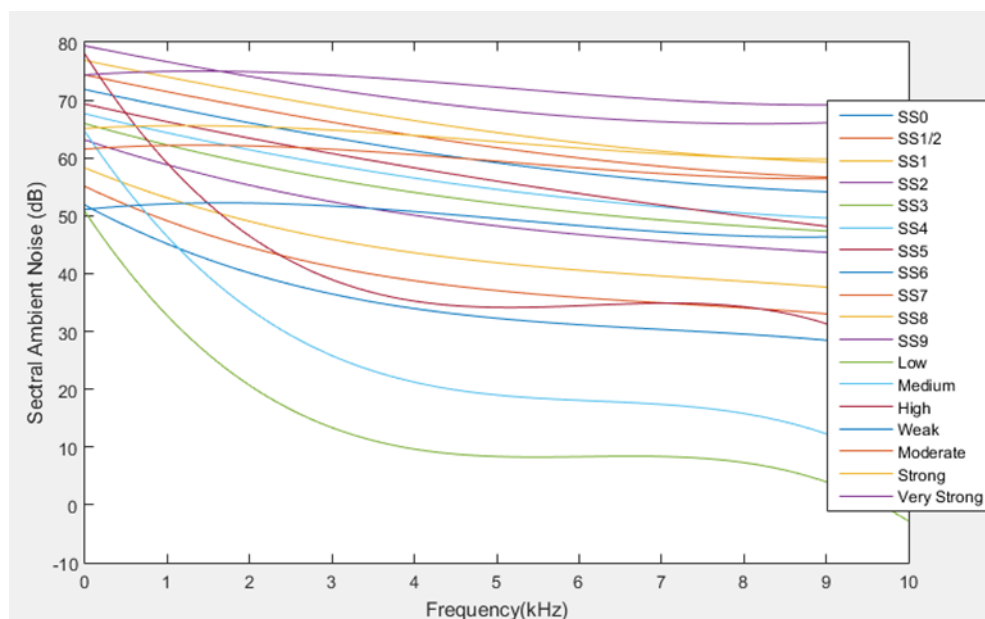


Figura 26: Funções resultantes da aplicação do método dos mínimos quadrados, recorrendo ao MATLAB para obtenção de resultados e apresentação dos mesmos.⁸²

Os resultados obtidos pelos dois métodos (Figuras 25 e 26) sugerem que o método de interpolação (Figura 25) produz estimativas mais realistas do nível de ruído ambiente espectral, porque os valores decrescem de forma monótona com a frequência a partir de $f = 1,5$ kHz (como seria expectável), o que não ocorre em diversas condições representadas na Figura 26. Para além disso, o método dos mínimos quadrados produz estimativas anormalmente baixas para algumas condições

Também é possível observar, em ambos os gráficos, que a fonte principal é a chuva, seguida do estado do mar e, finalmente, da densidade da navegação. Deve-se notar também que, pelo primeiro método, os dados sobre tráfego de navios existem apenas até à frequência de 1 kHz, com a criação de funções foi possível estender os dados até 10 kHz. Em ambos os casos, a presença de ruído é menos perceptível na parte superior do espectro.

2.11. Cálculo do Coeficiente de Absorção

Como referido no subcapítulo 1.8.2. **Perdas por Absorção** existem diversas fórmulas para o cálculo do coeficiente de absorção do som, entre elas: Fisher e Simon (1977) citadas por Kinsler *et al.* (1982), pp. 158-160; Ainslie e McColm (1998), pp. 1672-

⁸² Fonte: C. Torres e C. Costa (2019), *Underwater Ambient Noise – An Estimation Methodology*, p. 4, publicado e apresentado na Conferência Inter-Noise, Madrid, 16-19 de junho de 2019.

1673; Fisher e Simons simplificadas, conforme Kinsler *et al.* (1982), p. 398; W.H. Thorp (1967), conforme Urick (1983), p. 108; François e Garrison (1982), conforme Hodges (2010), p. 93; Mellen *et al.* (1987), conforme Hodges (2010), pp. 94-95. Há, assim, a necessidade de realizar testes a estas no sentido de determinar quais devem ser adotadas nas equações sonar, visto que nem todas as estudadas se enquadram no âmbito de utilização desta ferramenta operacional. Adicionalmente, como se pretende que o SeaRider seja aplicável a todas as áreas de operações, pretende-se que apenas sejam utilizadas as que são válidas para as diversas massas de água presentes no oceano. Para tal, foi realizado um levantamento destas à escala planetária, sendo que as características que as distinguem (imersões, temperaturas, salinidades e áreas geográficas) são apresentadas na **Tabela 6**.

Com o conhecimento das características das diversas massas de água, foi desenvolvido um programa em MATLAB para o cálculo do coeficiente de absorção para as mesmas. Tendo-se considerado as condições que são apresentadas na **Tabela 7**.

<i>Nível da Massa</i>	<i>Oceano</i>	<i>Massa de Água</i>
Upper Waters(0-500)	Atlantic Ocean	Atlantic Subarctic (T=2; S=34,5)
		Western North Atlantic Central Water (T=13,5; S=35,8)
		Eastern North Atlantic Central Water (T=13; S=35,9)
		South Atlantic Central Water (T=11,5; S=35,1)
	Indian Ocean	Bengal Bay Water (T=27; S=31,5)
		Arabian Sea Water (T=27; S=36)
		Indian Equatorial Water (T=15,5; S=34,8)
		Indonesian Upper Water (T=15,5; S=34,7)
	Pacific Ocean	South Indian Central Water(T=16,5; S=35,2)
		Pacific Subarctic Upper Water (T=9; S=33,1)
		Western North Pacific Central (T=16; S=34,7)
		Eastern North Pacific Central (T=16; S=34,6)
		Eastern North Pacific Transition (T=15,5; S=34,05)
		Pacific Equatorial Water (T=15; S=35,25)
		Western South Pacific Central (T=14; S=35,15)
Intermediate Waters(500-1500 m)	Atlantic Ocean	Eastern South Pacific Central (T=16; S=35,4)
		Eastern South Pacific Transition (T=17; S=34,9)
		Western Atlantic Subarctic (T=6; S=34,55)
		Eastern Atlantic Subarctic (T=6; S=34,85)
	Indian Ocean	Antarctic Intermediate Water (T=4; S=34,3)
		Mediterranean Water (T=6,8; S=35,6)
		Arctic Intermediate Water(T=1,5; S=34,8)
	Pacific Ocean	Antarctic Intermediate Water (T=6; S=34,3)
		Indonesian Intermediate Water(T=4,5; S=34,65)
		Red Sea-Persian Gulf Intermediate Water (T=9,5; S=35,1)
Deep and abyssal waters (1500m-bottom)	Atlantic Ocean	Pacific Subarctic Intermediate (T=8,5; S=34,05)
		California Intermediate Water (T=11; S=34,15)
		Eastern South Pacific Intermediate(T=11; S=34,2)
		Antarctic Intermediate Water(T=6; S=34,15)
Polos	Atlantic Ocean	North Atlantic Deep Water(T=2,8; S=34,9)
		Antarctic Bottom Water (T=1,3; S=34,7)
		Arctic Bottom Water(T=-6,2; S=34,9)
	Indian Ocean	Circumpolar Deep Water (T=1,5; S=34,7)
		Circumpolar Surface Waters
	Pacific Ocean	Circumpolar Deep Water (T=1,1; S=34,7)
		Subantarctic Surface Water (T=9,1; S=34,8)
		Antarctic Surface Water(T=0; S=34,3)

Tabela 6: Massas de água à escala global, tendo em conta a profundidade das mesmas, oceano em que se localizam e respetivas gamas de temperaturas e de salinidades.

<i>Variável</i>	<i>Valor</i>
Frequência	7 KHz
Profundidade: <i>Upper Waters</i>	0,25 Km
Profundidade: <i>Intermediate Waters</i>	1 Km
Profundidade: <i>Deep and Abyssal Waters</i>	2,5 Km
pH	8

Tabela 7: Condições iniciais para o cálculo do coeficiente de absorção para as diversas massas de água.

Os resultados obtidos foram inseridos numa tabela para serem analisados, sendo apresentados na **Tabela 8**. A unidade de medida dos valores apresentados corresponde a dB/km, que responderá às unidades com que a modelação acústica será resolvida.

<i>Massa de Água</i>	<i>Fisher e Simmons</i>	<i>Ainslie e McColm</i>	<i>Thorp</i>	<i>François e Garrison</i>	<i>Mellen</i>
Atlantic Subarctic (T=2; S=34,5)	0,04579	0,063156	0,064182	0,064552	0,064346
Western North Atlantic Central Water (T=13,5; S=35,8)	0,038068	0,050151	0,064182	0,050184	0,052007
Eastern North Atlantic Central Water (T=13; S=35,9)	0,038316	0,050771	0,064182	0,050841	0,05252
South Atlantic Central Water (T=11,5; S=35,1)	0,0391	0,05139	0,064182	0,051527	0,054093
Bengal Bay Water (T=27; S=31,5)	0,033322	0,03861	0,064182	0,037301	0,042211
Arabian Sea Water (T=27; S=36)	0,033322	0,042249	0,064182	0,041062	0,042211
Indian Equatorial Water (T=15,5; S=34,8)	0,037143	0,047199	0,064182	0,047066	0,050028
Indonesian Upper Water (T=15,5; S=34,7)	0,037143	0,04709	0,064182	0,046952	0,050028
South Indian Central Water (T=16,5; S=35,2)	0,036716	0,046817	0,064182	0,046635	0,049093
Pacific Subarctic Upper Water (T=9; S=33,1)	0,040556	0,051622	0,064182	0,051866	0,05678
Western North Pacific Central (T=16; S=34,7)	0,036927	0,04668	0,064182	0,046511	0,049556
Eastern North Pacific Central (T=16; S=34,6)	0,036927	0,046572	0,064182	0,0464	0,049556
Eastern North Pacific Transition (T=15,5; S=34,05)	0,037143	0,046432	0,064182	0,046272	0,050028
Pacific Equatorial Water (T=15; S=35,25)	0,037365	0,048181	0,064182	0,048097	0,050511
Western South Pacific Central (T=14; S=35,15)	0,037827	0,048979	0,064182	0,048954	0,051501
Eastern South Pacific Central (T=16; S=35,4)	0,036927	0,047436	0,064182	0,047293	0,049556
Eastern South Pacific Transition (T=17; S=34,9)	0,036511	0,046115	0,064182	0,045888	0,04864
Western Atlantic Subarctic (T=6; S=34,55)	0,040276	0,052066	0,064182	0,058145	0,056935
Eastern Atlantic Subarctic (T=6; S=34,85)	0,040276	0,052456	0,064182	0,0586	0,056935
Antarctic Intermediate Water (T=4; S=34,3)	0,041661	0,054076	0,064182	0,060813	0,058849
Mediterranean Water (T=6,8; S=35,6)	0,039636	0,052183	0,064182	0,058141	0,055969
Arctic Intermediate Water (T=1,5; S=34,8)	0,0436	0,058034	0,064182	0,065963	0,06124
Antarctic Intermediate Water (T=6; S=34,3)	0,040276	0,051676	0,064182	0,05769	0,056935
Indonesian Intermediate Water (T=4,5; S=34,65)	0,041301	0,054003	0,064182	0,060643	0,058372
Red Sea-Persian Gulf Intermediate Water (T=9,5; S=35,1)	0,03818	0,048858	0,064182	0,053968	0,053529
Pacific Subarctic Intermediate (T=8,5; S=34,05)	0,038739	0,048689	0,064182	0,05389	0,054508
California Intermediate Water (T=11; S=34,15)	0,037397	0,046385	0,064182	0,050942	0,052065
Eastern South Pacific Intermediate (T=11; S=34,2)	0,037397	0,046385	0,064182	0,050942	0,052065
Antarctic Intermediate Water (T=6; S=34,15)	0,040276	0,051546	0,064182	0,057539	0,056935
North Atlantic Deep Water (T=2,8; S=34,9)	0,037492	0,046245	0,064182	0,06381	0,053869
Antarctic Bottom Water (T=1,3; S=34,7)	0,038458	0,047475	0,064182	0,066139	0,054959
Arctic Bottom Water (T=-6,2; S=34,9)	0,044514	0,055535	0,064182	0,081498	0,0661154
Circumpolar Deep Water (T=1,5; S=34,7)	0,038325	0,047277	0,064182	0,065776	0,054813
Circumpolar Surface Waters			0,064182		
Circumpolar Deep Water (T=1,1; S=34,7)	0,038592	0,047674	0,064182	0,066505	0,055105
Subantarctic Surface Water (T=9,1; S=34,8)	0,03421	0,040839	0,064182	0,054067	0,049083
Antarctic Surface Water (T=0; S=34,3)	0,039358	0,048294	0,064182	0,067826	0,055314

Tabela 8: Resultados da aplicação das diversas fórmulas às massas de água existentes, com a aplicação das condições iniciais definidas na **Tabela 7**.

Após uma análise dos resultados obtidos, verificou-se que a fórmula de Fisher e Simmons apenas é aplicável para temperaturas entre 0°C e os 30°C, não considerando a influência da salinidade no coeficiente de absorção, daí não ser utilizada nesta ferramenta operacional. Por sua vez, a fórmula de Fisher e Simmons simplificada apenas é aplicável para uma temperatura igual a 5°C e pressão hidrostática correspondente a 0 atmosferas (na superfície do mar), pelo que o seu âmbito de utilização é bastante restrito, não sendo assim relevante no contexto desta dissertação. Finalmente, a fórmula de Thorp apenas considera como variável a frequência, não tendo variações para as diversas massas de água, não representando a realidade.

Para resolver esta questão, o valor final do coeficiente resulta da média aritmética das seguintes fórmulas: François e Garrison, Mellen *et al.* e Ainslie e McColm. Como estas

consideraram a temperatura, salinidade, pH, profundidade e frequência do transdutor, adaptam-se a todas as condições de operação dos sonares de bordo e consequentemente do programa desta tese. Esta opção resultou da análise da informação produzida, no contexto das massas de água, apresentada na **Tabela 8**.

2.12. Cálculo do Ruído Próprio

Este parâmetro, como já referido no subcapítulo **1.6.3. Ruído Próprio**, depende do tipo de propulsão a ser utilizado, da própria plataforma, da velocidade do navio e até do ruído gerado pela guarnição. Pela dificuldade de o definir, quando é realizada a previsão sonar, foi feita a digitalização⁸³ do gráfico proposto por Urick (1983), p. 374. Como os dados apresentados são relativamente antigos e a evolução tecnológica vivida nas últimas décadas reduziu o ruído gerado pelos navios, é dada a possibilidade ao utilizador de fazer uma calibração relativamente ao “*destroyer* moderno” (em 1983) definido por aquele autor. Na **Figura 27** encontra-se o gráfico proposto por Urick (1983).

Apesar de ser conveniente o estudo de gráficos de ruídos próprios dos navios mais recentes, a nível militar esta informação não é divulgada, de modo a garantir que as restantes marinhas não detêm conhecimento da assinatura acústica dos nossos navios. Contudo, o operador poderá introduzir o valor do ruído próprio da sua plataforma em detrimento da calibração relativa ao navio estudado por Urick (1983).

⁸³ Define-se como digitalização a recolha dos dados do ruído próprio, tendo em conta o estado do mar e a velocidade do navio.

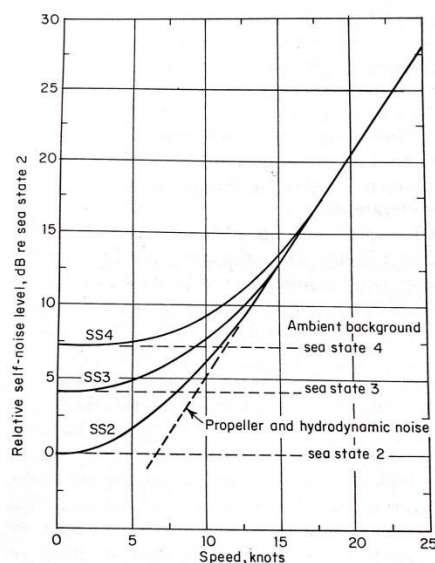


Figura 27: Curva de ruído próprio, dependendo do estado do mar e da velocidade do navio, segundo Urick (1983), p. 374, para um “*destroyer* moderno” (em 1983).

2.13. Métodos de Cálculo de Perdas de Transmissão

As perdas de transmissão, tal como explicado no subcapítulo 1.8. **Perdas por Transmissão**, dependem da geometria da dispersão e da absorção sofrida pelos raios sonoros devido à sua propagação na água do mar.

A absorção depende de um conjunto de características do meio onde ocorre a propagação acústica, nomeadamente a temperatura, a salinidade, o pH (que é tido, por defeito, como 8,2, valor médio ou típico do oceano, sendo possível introduzir o pH específico da área de operações) e da profundidade; depende ainda do equipamento acústico, mais concretamente da sua frequência de operação. Para resolver este problema foram utilizados os perfis da WOD18, que fornecem a temperatura *insitu* e a salinidade prática para praticamente todas as áreas navegáveis, sendo determinado o valor médio local, na coluna de água, destes parâmetros para que seja possível o cálculo do coeficiente de absorção. Valores normais para este parâmetro rondam os 0,6 dB/km.

Os métodos disponibilizados, nesta ferramenta operacional, para a determinação das perdas de transmissão, foram a separação vertical de raios e a dispersão esférico-cilíndrica, sendo que o método utilizado fica ao critério do utilizador. Na **Figura 28** é apresentada a janela do programa na qual é efetuada a escolha do método pretendido.

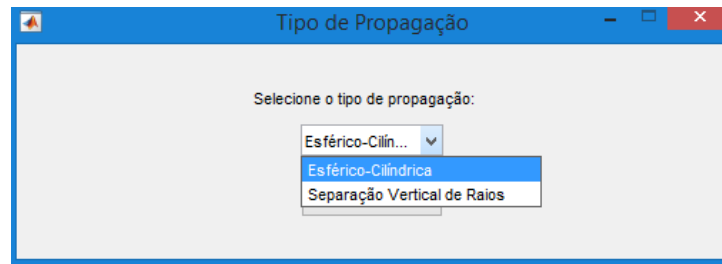


Figura 28: Janela da ferramenta operacional SeaRider para a seleção do método de cálculo das perdas de transmissão.

Os programas que recorrem às teorias de *raytracing* para a modelação da acústica submarina, no caso da Marinha Portuguesa o *Raypath*, mas também o *Lybin*, estimam as perdas de transmissão através da distância vertical de separação de raios.

Estas perdas de transmissão, entre a fonte e qualquer ponto do diagrama de raios (como já referido anteriormente os cálculos são efetuados para os pontos de controlo da função *raytrace* adotada), podem ser determinados através do espaçamento vertical entre raios que são projetados a incrementos verticais de um grau na fonte, e que relativamente ao alvo ou pontos de controlo em estudo se irão propagar, ao longo da distância, a intervalos verticais variáveis. Na **Figura 29** encontram-se representados um par de raios, separados por um pequeno ângulo vertical $\Delta\theta$, deixando a fonte que corresponde à origem da propagação acústica, nos ângulos $\theta_1 + \frac{\Delta\theta}{2}$ e $\theta_1 - \frac{\Delta\theta}{2}$ relativamente à horizontal.

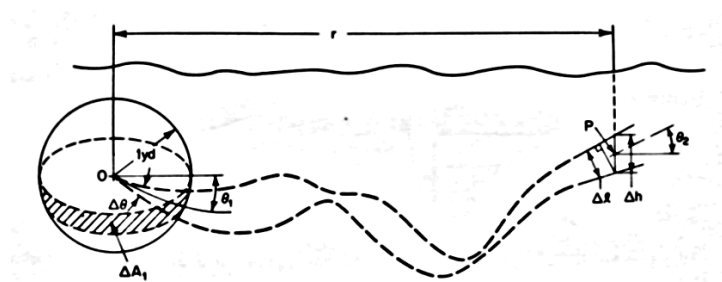


Figura 29: O afastamento vertical de dois raios e a respetiva abertura angular no transdutor $\Delta\theta$ permitem determinar, no alvo ou ponto de controlo da função *raytrace*, o valor das perdas de transmissão.⁸⁴

Após a sua propagação por qualquer par de caminhos refratados, por mais complexos que estes sejam, como mostrado esquematicamente pelas curvas tracejadas,

⁸⁴ Fonte: Urlick (1983), p. 127.

estes raios sonoros aparecem na vizinhança do alvo ou dos pontos de controlo, com ângulo θ_2 relativamente à horizontal, cuja separação vertical corresponde a Δh .

Assim, a intensidade acústica a um metro da fonte acústica (I_1), na direção de θ_1 é dada pela seguinte expressão⁸⁵, na qual ΔA_1 corresponde à área associada à propagação dos raios sonoros adjacentes a um metro da dita fonte.

$$I_1 = \frac{\Delta P}{\Delta A_1}$$

O mesmo sucede para o alvo ou para os referidos pontos de controlo, com intensidade I_2 .

$$I_2 = \frac{\Delta P}{\Delta A_2}$$

Assim, as perdas por transmissão são dadas pela seguinte expressão⁸⁶.

$$TL = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log \frac{\Delta A_1}{\Delta A_2}$$

Contudo, é possível determinar ΔA_1 e ΔA_2 , e consequentemente simplificar as perdas de transmissão de modo a facilitar os cálculos na ferramenta operacional. Estes dois parâmetros são dados pelas seguintes expressões⁸⁷.

$$\Delta A_1 = 2\pi \cos(\theta_1) \Delta \theta$$

$$\Delta A_2 = 2\pi r \Delta l$$

Com esta simplificação e através da aplicação da lei de Snell, as perdas de transmissão, através do método de separação de raios, são dadas pela seguinte expressão⁸⁸.

$$TL = 10 \log \frac{r \Delta h}{\Delta \theta} \frac{c_2}{c_1}$$

Assim, com a aplicação deste método, é possível quantificar os fenómenos de convergência e divergência, sendo que, geralmente, as perdas são menores em zonas de convergência de raios e maiores em zonas de divergência ou nas designadas zonas sombra.

⁸⁵ Fonte: Urick (1983), p. 127.

⁸⁶ Fonte: Urick (1983), p. 127.

⁸⁷ Fonte: Urick (1983), p. 127.

⁸⁸ Fonte: Urick (1983), p. 128.

Se Δh diminuir, ocorre convergência dos raios sonoros e consequentemente uma diminuição de TL, se pelo contrário Δh aumentar, a situação é de divergência e TL aumenta.

Contudo, este método é bastante complexo de processar, pelo que em certas condições de operação desta ferramenta operacional poderá levar à existência de erros numéricos, tornando a previsão menos fiável. Mas constitui um modo alternativo, à dispersão geométrica, disponibilizada ao utilizador.

O outro método possível de ser seleccionado pelo operador é a dispersão esférico-cilíndrica, no qual o utilizador poderá introduzir um fator designado de *beta*, o qual indica se a dispersão se aproxima mais da esférica ($beta = 2$) ou da cilíndrica ($beta = 1$). Na **Figura 30** é apresentada a janela que introdução deste parâmetro.

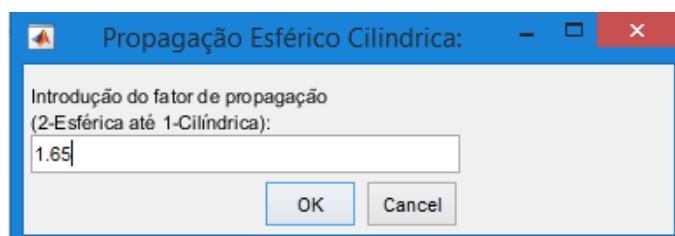


Figura 30: Janela da ferramenta operacional SeaRider para a seleção fator *beta* (entre 1 e 2) da dispersão esférico-cilíndrica.

Para profundidades superiores, as chamadas águas profundas (para este efeito considera-se que a batimetria deverá ser superior a 200 metros), a propagação tem uma dispersão geométrica próxima da esférica, sendo aconselhado um fator *beta* a rondar os 1,8; já para águas pouco profundas (para este efeito considera-se que a batimetria deverá ser inferior a 200 metros), o valor de *beta* deverá ser próximo de 1,2. Assim, a expressão utilizada para este método de cálculo das perdas de transmissão é a seguinte.

$$TL = 10 * beta * \log r$$

A precisão deste método para determinar TL para um certo diagrama de raios, além das limitações impostas pela própria propagação, depende da densidade ou do número de raios traçados no referido diagrama, ou seja, do intervalo de raios considerado. Este método falha na vizinhança imediata das cáusticas⁸⁹, onde a teoria das ondas é essencial

⁸⁹ Cáusticas são curvas resultantes do cruzamento de raios, refletidos ou refratados por uma superfície curva.

para fazer uma estimativa rigorosa da intensidade. No entanto, para as condições simples descritas permite previsões úteis das perdas de transmissão através de cálculos simples. Toda a energia emitida da fonte, dentro de um par de raios do diagrama, permanece dentro desse par de raios; não há dispersão por falta de homogeneidade nem difração como ditado pela teoria de ondas.

2.14. Nível de Reverberação

O estudo das reverberações exige a sua divisão em três componentes distintas, de referir a reverberação de volume, de superfície e de fundo, sendo que cada uma destas exige um processo diferente para a sua resolução.

A reverberação de volume existe devido à presença na água do mar de seres vivos ou dispersores, que geram reflexões aleatórias indesejadas que são posteriormente detetadas pelos receptores dos equipamentos acústicos, dificultando a deteção do sinal útil pretendido, ou seja, do alvo. Para ser possível o cálculo, é necessário determinar os valores de *backscattering*, também designadas de espalhamento de retorno, que é característico de cada profundidade da coluna de água que se pretende estudar, dependendo ainda do tempo de propagação considerado e da frequência do sonar em questão, além da área geográfica oceânica em questão. Este parâmetro caracteriza-se por uma elevada variabilidade temporal e espacial, devendo-se, sempre que possível, caracterizar a área de operação com a informação oceanográfica disponível, assim como a vida marinha que nela habita. Para o cálculo da reverberação de volume são utilizadas as seguintes expressões⁹⁰.

$$RL_v = SL - 40 \log \frac{ct}{2} + S_v + 10 \log V$$

$$V = \frac{c\tau}{2} \psi r^2$$

$$r = \frac{c t}{2}$$

Na qual SL representa o nível de intensidade do sonar, r a distância de propagação (são utilizados os pontos de controlo da função *raytrace* para esse efeito), S_v a *backscattering strength* de volume (perante a necessidade de atribuir um valor a este parâmetro considerou-se -80 dB, sendo que os valores típicos para alto mar se encontram entre -60 e -100 dB), V

⁹⁰ Fonte: Urick (1983) p. 242.

o elemento de volume, c a velocidade do som (é calculada a média da velocidade do som para a coluna de água), t o tempo de propagação em segundos, τ a duração dos impulso (foi atribuído o valor de 1,5 segundos) e Ψ o ângulo sólido considerado, sendo o incremento entre raios igual a um grau.

O processo para a determinação da reverberação de fundo e superfície é bastante mais complexo, visto que depende de um conjunto bastante diversificado de fatores. Contudo, depende sempre do nível de intensidade de emissão do sistema acústico do navio, da capacidade refletora da superfície ou do fundo do mar (TS_{rev}) e das perdas de transmissão sofridas pelo sinal sonoro até ao espalhador e também, após a sua reflexão, até ao receptor, ou seja, $2TL_{rev}$. Resultando genericamente a seguinte expressão⁹¹.

$$RL = SL + TS_{rev} - 2TL_{rev}$$

Para a determinação de TS_{rev} é utilizada a seguinte expressão⁹².

$$TS_{rev} = BS_{rev} + 10\log(A \text{ ou } V)$$

Como nesta ferramenta operacional se assume que os diversos raios definidos pelo operador são normais às superfícies isofásicas da onda plana, significa que não é possível calcular imediatamente a área gerada pelas interações com o fundo e a superfície. Assim, para os cálculos iniciais assume-se que a área de reverberação de cada um dos raios em estudo é um metro quadrado (adiante serão calculadas as áreas efetivas associadas a cada raio). Deste modo, resulta a expressão apresentada de seguida.

$$TS_{rev} = BS_{rev}$$

Definido genericamente o método utilizado para o cálculo das reverberações, será agora estudado o fundo e a superfície com maior detalhe.

Para a determinação do valor de espalhamento de retorno da superfície do mar é utilizada a seguinte expressão⁹³.

$$BS_s = 9,9 \log [f h \sin(\varphi)] - 45,3$$

⁹¹ Fonte: Hodges (2010), p.154.

⁹² Fonte: Hodges (2010), p.154.

⁹³ Fonte: Hodges (2010), p.151.

Na fórmula anterior para o cálculo de BS_s , f representa a frequência de operação do sonar utilizado na deteção de alvos, em kHz, φ o ângulo de incidência (*grazing angle* relativas à horizontal) na superfície dos diversos raios sonoros e h a rugosidade da superfície do mar em pés, sendo esta rugosidade determinada através do estado do mar introduzido pelo operador, que tem associado uma altura de vaga ou ondulação em metros, que é posteriormente convertida em pés para aplicação da fórmula. De referir que esta expressão apenas pode ser aplicada se o ângulo de incidência não for normal à superfície. Na **Figura 31** são apresentados valores característicos para BS de superfície.

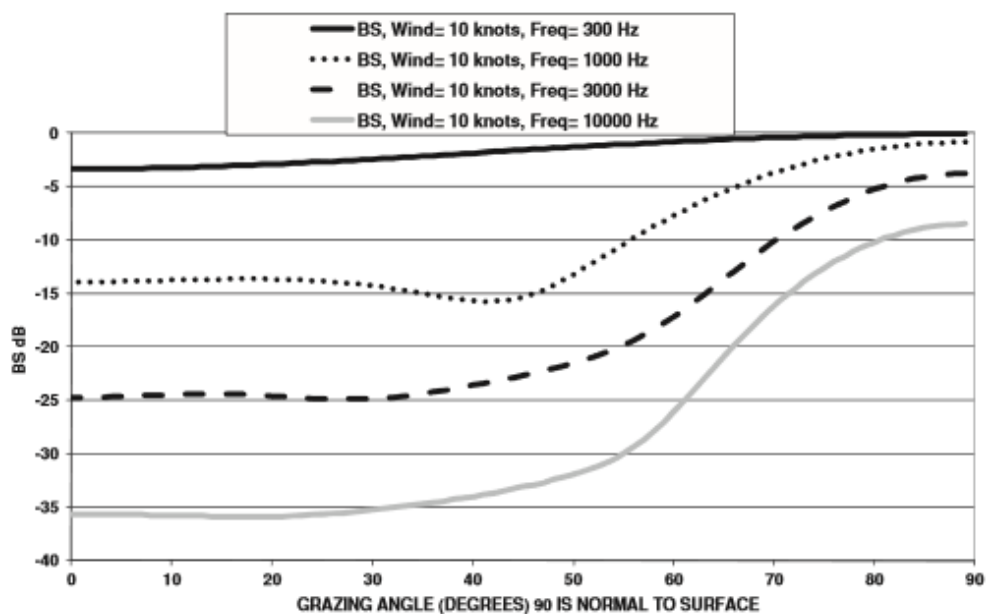


Figura 31: Valores de BS de superfície tendo em conta a velocidade do vento a 10 nós e a frequência de operação do sistema acústico. Considera-se o *grazing angle* normal à superfície.⁹⁴

Ou seja, para cada raio pertencente ao intervalo considerado calcula as perdas por reflexão para cada interação com a superfície, acumulando essas perdas ao longo da distância, tendo em conta o número de interações sofridas até ao ponto de controlo considerado. Também calcula a *target strength* (na Marinha, no contexto de armas submarinas, é referido como índice de refletividade) associada ao *backscattering* das reverberações geradas.

⁹⁴ Fonte: Hodges (2010), p.147.

Relativamente ao fundo, existem tabelas que fornecem o *backscattering* associado aos diversos tipos de fundos que podem ser encontrados. Na **Tabela 9** são definidos os BS correspondentes a esses fundos (Waite 2002, p. 115).

<u><i>Tipo de Fundo</i></u>	<u><i>BS (dB)</i></u>
Areia fina	-40
Rocha	-27
Areia com rocha	-33
Areia grossa	-36
Lodo	-45

Tabela 9: BS associado a cada tipo de fundo, para o cálculo das reverberações de fundo. Fonte: Waite (2002) p. 115.

O estudo efetuado por Waite (2002), em águas pouco profundas do Reino Unido, demonstrou que o BS da areia e do lodo depende diretamente da frequência de operação do sonar (quanto maior a frequência de emissão maior o BS de fundo), ao contrário do que acontece para os restantes casos da tabela anterior. Na **Figura 32** é apresentado o resultado das medições de BS, nesse estudo efetuado em águas pouco profundas.

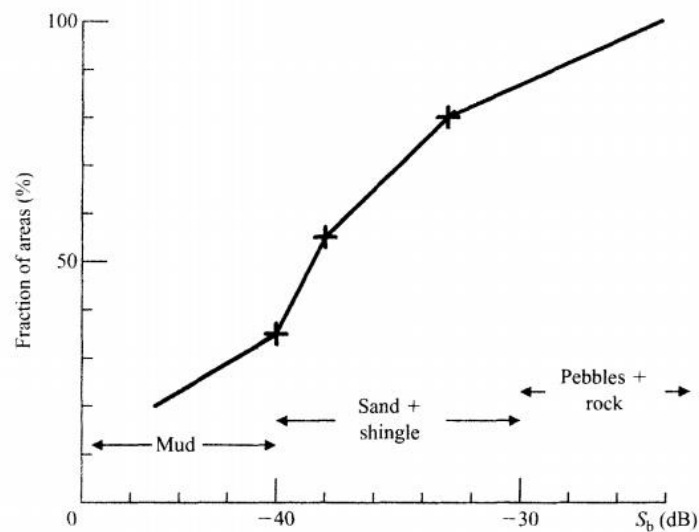


Figura 32: Medições efetuadas no Reino Unido, nas designadas *shallow waters*, com os tipos de fundo mais comuns (lodo, areia e rocha) e os seus níveis *backscattering strength*.⁹⁵

A determinação do nível de reverberação é efetuada raio a raio, sendo os valores guardados numa matriz de duas dimensões (com os raios em linha e as reverberações em coluna), permitindo conhecer, para os diversos pontos de controlo da função *raytrace*, as perdas por reflexão e a reverberação em função da distância à fonte acústica.

Na realidade, da mesma forma que o sinal acústico sofre atenuação até atingir o espalhador, o sinal refletido na direção do receptor ou *backscattering* de retorno, sofre também uma atenuação. Assim, quando se consideram os valores de reverberação também deverá ser tida em conta a atenuação que estas sofrem até serem detetadas pelo receptor.

As reverberações de fundo, tal como as de superfície, dependem da distância entre a fonte acústica e os espalhadores, assim como das áreas de interseção com o fundo, cujo processo de cálculo foi anteriormente explicado, mas que, resumidamente, considera-se equivalente a um círculo, cujo raio corresponde à metade da distância entre interações de raios sucessivos. No caso do fundo, a única modelação que é realizada a nível do *backscattering* é em função do tipo de fundo, cujos valores rondam os da **Figura 32** e **Tabela 9**, desde que a frequência de operação do sonar seja inferior a 10 kHz, o que acontece na generalidade das situações. Já na superfície este parâmetro depende sempre da frequência e da agitação marítima, o que é equivalente a dizer-se “estado do mar”.

⁹⁵ Fonte: Waite (2002), p.115.

Em termos de cálculos, nesta ferramenta operacional, são desprezados todos os valores negativos da reverberação, sendo que esse sinal deve-se às reflexões nos espalhadores serem atenuadas antes de serem detetadas pelo receptor, ou seja, a intensidade do sinal refletido não é suficiente para propagar-se entre o espalhador e o receptor.

Na prática, segundo o modelo adotado para o cálculo das reverberações assume-se que estas chegam todas ao mesmo tempo ao receptor, o que apesar de não representar a realidade do ambiente submarino, é uma aproximação aceitável e que facilita os cálculos. Para além disso, a reverberação não é mais que a reflexão, por espalhadores, da frente de onda sonora, em que RL atinge o valor máximo no momento da reflexão e diminui com a distância percorrida desde esse instante, chegando a não ser detetada pelos receptores.

2.15. Cálculo do Excesso de Sinal e do Alcance

O principal objetivo desta ferramenta operacional é a determinação do excesso de sinal e do alcance provável de deteção e de contra deteção. Para tal resolvem-se as equações sonar (passiva ou ativa, dependendo do modo de funcionamento do sonar), utilizando sempre os valores em dB, para que as mesmas sejam meras somas e subtrações dos parâmetros que as constituem.

Todos os parâmetros que constituem as equações sonar foram já abordados ao longo desta dissertação, sejam estes relevantes para o sonar em funcionamento ativo ou passivo. Basicamente, estes cálculos de excesso de sinal dependem das coordenadas verticais e horizontais resultantes da aplicação da função *raytracing*, correspondentes ao trajeto dos raios introduzidos pelos operadores desta ferramenta operacional.

Dependendo dessas coordenadas são criadas matrizes, com as distâncias horizontais e totais de cada um desses raios, sendo as primeiras utilizadas para determinar os índices em que ocorrem interações com o fundo (importante para o cálculo das perdas do fundo e de reverberações), enquanto as segundas (distâncias totais) serão utilizadas para as perdas por absorção e perdas de transmissão.

Como já foi referido, as perdas de transmissão dependem do tipo de dispersão selecionada pelo operador (esférico-cilíndrica ou por separação vertical de raios), sendo depois calculadas para os diversos pontos de controlo de cada raio. A absorção depende da temperatura, salinidade, pH e imersão dos perfis selecionados.

No caso do sonar ativo as reverberações são calculadas para os diversos pontos de controlo, tendo em conta as coordenadas verticais e horizontais para as quais ocorrem interação com a superfície ou com o fundo. Os valores obtidos são comparados com o nível de ruído ambiente, sendo que na equação para o excesso de sinal apenas será considerado o maior valor de ambos os vetores, para os diversos pontos de controlo, uma vez que se presume que em simultâneo prevalecerá o mais elevado. Sendo assim mais um parâmetro limitativo para o alcance sonar.

Por último, é calculado o vetor de excesso de sinal, em função da distância percorrida pelos diversos raios sonoros, determinando-se quando $SE = 0 \text{ dB}$, que corresponde ao alcance sonar ou de contra deteção, dependendo do modo de operação do equipamento acústico. Os alcances de cada raio são apresentados no gráfico de *raytracing*, tal como apresentado na **Figura 34**.

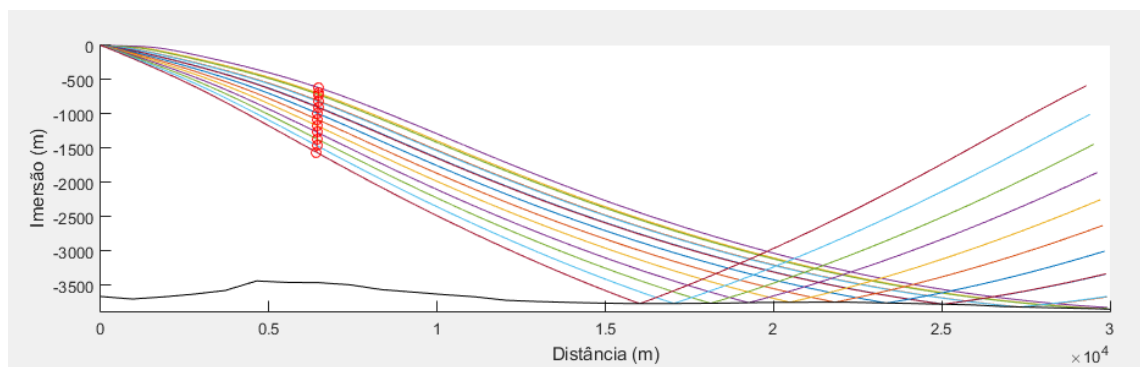


Figura 33: Função *raytracing* e respetivos alcances sonar resultantes da aplicação da base de dados anual, com 1° de resolução espacial, para a posição 36,9° N e 39,9° W, para um azimute de 090° e distância de 30 km, com o sonar a operar em modo ativo.

O gráfico de SE apresenta os valores de excesso de sinal com um gradiente de cores para variações de $SE = 5 \text{ dB}$. Além disso é apresentado o perfil do fundo, tendo em conta o azimute e a distância introduzida, e as interações com o fundo e a superfície, tal como demonstrado na **Figura 35**.

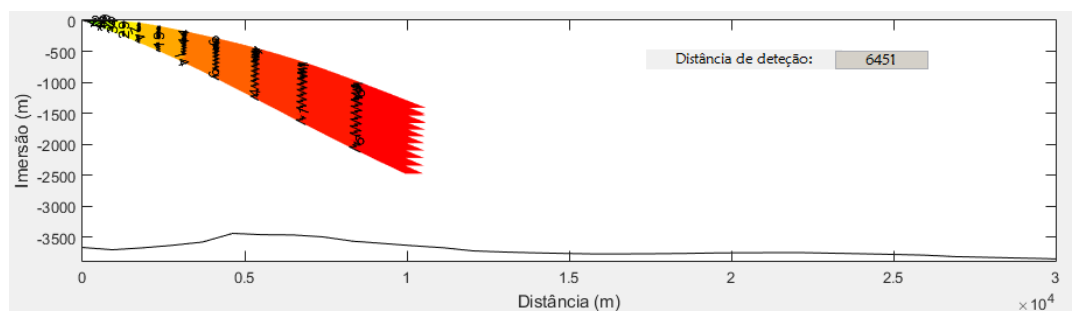


Figura 34: Gráfico de excesso de sinal e respectivos alcances sonar resultantes da aplicação da base de dados anual, com 1° de resolução espacial, para a posição 36,9° N e 39,9° W, para um azimuth de 090° e distância de 30 km, com o sonar a operar em modo ativo.

Os mesmos resultados serão demonstrados para o sonar a operar em modo passivo, para o qual os alcances (contra detecção) serão bastante superiores. Sendo a função *raytrace* apresentada na **Figura 36** e o excesso de sinal na **Figura 37**.

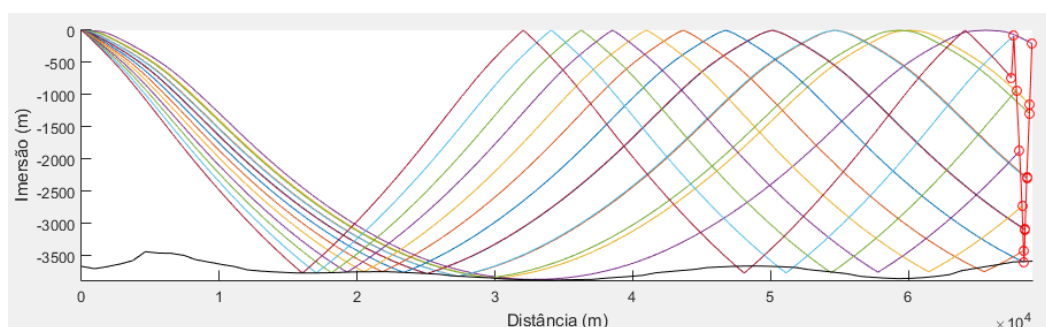


Figura 35: Gráfico da função *raytracing* e respectivos alcances sonar resultantes da aplicação da base de dados anual, com 1° de resolução espacial, para a posição 36,9° N e 39,9° W, para um azimuth de 090° e distância de 68 km, com o sonar a operar em modo passivo.

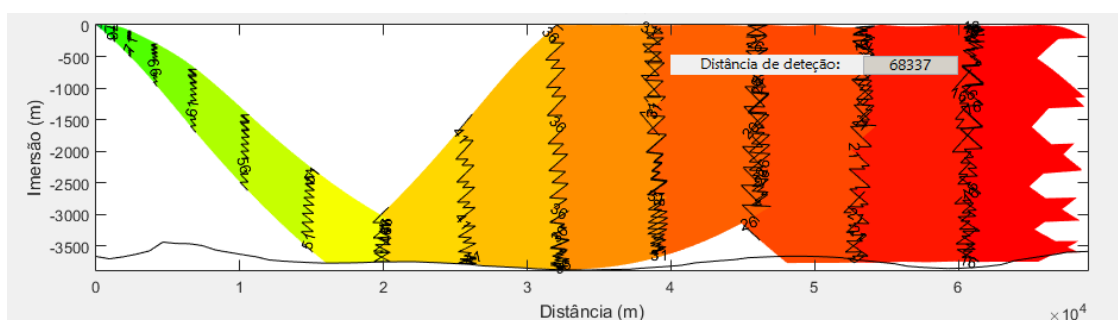


Figura 36: Gráfico de excesso de sinal e respectivos alcances sonar resultantes da aplicação da base de dados anual, com 1° de resolução espacial, para a posição 36,9° N e 39,9° W, para um azimuth de 090° e distância de 68 km, com o sonar a operar em modo passivo.

Capítulo 3. Discussão de Resultados

Neste capítulo pretende-se efetuar uma análise à ferramenta operacional desenvolvida, SeaRider. Nesse sentido, foram realizadas diversas “corridas” para posições geográficas distintas, diferentes modos de operação sonar e para alterações aos parâmetros considerados para a resolução das equações sonar.

Para aplicação de dados reais, a nível de ficheiro BT (batitermógrafo) foi usado o perfil de temperatura recolhido a bordo do NRP “D. Francisco de Almeida”, no âmbito do exercício multinacional SWORDFISH 2018, realizado entre 20 de junho de 2018 e 28 de junho de 2018, durante a realização de exercícios ASW. Já a nível do CTD, foi utilizado o ficheiro obtido a bordo do NRP “Zarco”, no dia 27 de abril de 2019, na baía de Cascais, no âmbito dos embarques de treino de cadetes da Escola Naval.

Assim, foram realizadas diversas “corridas” para comparar os perfis resultantes de ficheiros BT, CTD e climatologia; a separação vertical de raios e a dispersão esférico-cilíndrica; os modos de operação do sonar e respetivos alcances; bem como a influência que os diversos parâmetros da equação sonar têm nos resultados da previsão sonar. Também foram comparados os resultados entre diversas posições geográficas, no sentido de compreender de que forma o perfil batimétrico influencia a deteção ou a contra deteção.

Pretende-se, assim, concluir sobre a vantagem da utilização de perfis recolhidos de sondas em comparação com a climatologia da base de dados da NOAA, de que forma o perfil do fundo influencia o alcance da deteção e contra deteção, e até a relevância que as características técnicas dos equipamentos acústicos ostentam na previsão sonar realizada. Foi procurada a escolha de “corridas” que sejam relevantes e permitam tirar conclusões importantes no âmbito desta dissertação de mestrado, e que ao mesmo tempo demonstrem que o SeaRider poderá vir a ser um bom substituto do *Raypath* na Marinha Portuguesa.

Por convenção adotou-se a utilização das posições geográficas em decimal, de modo a corresponderem aos dados de entrada do programa, e consequentemente das bases de dados.

3.1. Comparação dos Perfis Obtidos com o CTD, a Sonda XBT e a Climatologia

Começando por descrever o perfil de temperatura obtido de uma sonda BT recolhido a bordo do NRP “D. Francisco de Almeida”, antes de um exercício, cujo objetivo era a deteção e neutralização da ameaça submarina, o que exige sempre conhecimento da previsão sonar e do traçado de raios sonoros. Para estas séries, são geralmente utilizados perfis de sondas para permitir a modelação eficaz da acústica submarina. De salientar que os dados obtidos das sondas XBT e XSV podem ainda ser inseridos manualmente nas tabelas existentes no separador “XBT”, sendo um processo bastante mais moroso e sujeito a erros de introdução.

O exercício teve o seu começo pelas 12h30 de 22 de junho de 2018, na posição geográfica 38,1° N e 009,3 W. Relativamente às condições meteorológicas durante a série é de realçar o seguinte: vento de oeste com velocidade de 10 nós e vaga de oeste com altura de 0,5 metros (correspondendo ao estado do mar 2). Com a informação proveniente de levantamentos hidrográficos determinou-se que o fundo seria predominantemente de areia fina.

Após o lançamento da sonda XBT, são registados os diversos valores recolhidos pela mesma, sendo depois analisados pelo supervisor sonar (normalmente este cargo é assumido pelo sargento torpedeiro de bordo), que seleciona os pontos de temperatura, em função da imersão, para a obtenção dos perfis. Geralmente, esta seleção depende dos pontos em que se verificam maiores alterações do parâmetro temperatura, sendo este indicador relevante para distinguir a existência de uma zona de separação de duas camadas de água distintas, sendo a expressão técnica em Oceanografia, profundidade de camada. Na **Figura 37** está representado o perfil obtido deste ficheiro.

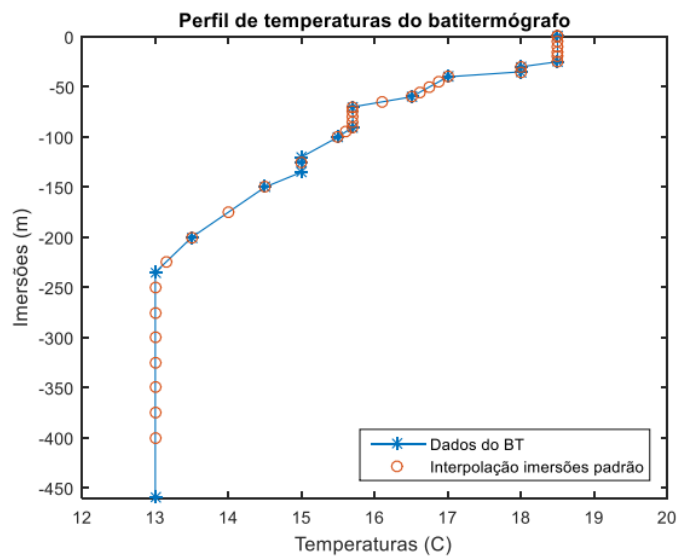


Figura 37: Perfil de temperaturas resultante do ficheiro BT, obtido a bordo do NRP "Francisco de Almeida" durante o exercício multinacional SWORDFISH 18, pelas 12h30 de 22 de junho de 2018. Estando representado com asteriscos os pontos selecionados pelo supervisor sonar, e com círculos os resultantes de aplicação de um processo de interpolação.

Tendo-se aplicado este perfil de temperatura no SeaRider, bastando para tal introduzir o nome do ficheiro, e completando o mesmo com os dados da climatologia⁹⁶ obtiveram-se os perfis de salinidade e velocidade do som apresentados na **Figura 38**. Por conveniência prática, adotou-se para as pressões valores negativos em profundidade, de modo que os perfis apresentem o seu topo na superfície do mar e a parte inferior em profundidade; contudo deve-se salientar que a pressão é sempre positiva. De notar que as diferenças entre a climatologia e os dados do XTD/BT podem ser significativas, desde a superfície até imersões onde esteja presente a termoclina sazonal, geralmente até aos 130-140 m de imersão, no máximo.

⁹⁶ Substitui-se os dados da climatologia pelos dados do CTD/XBT até à imersão máxima amostrada.

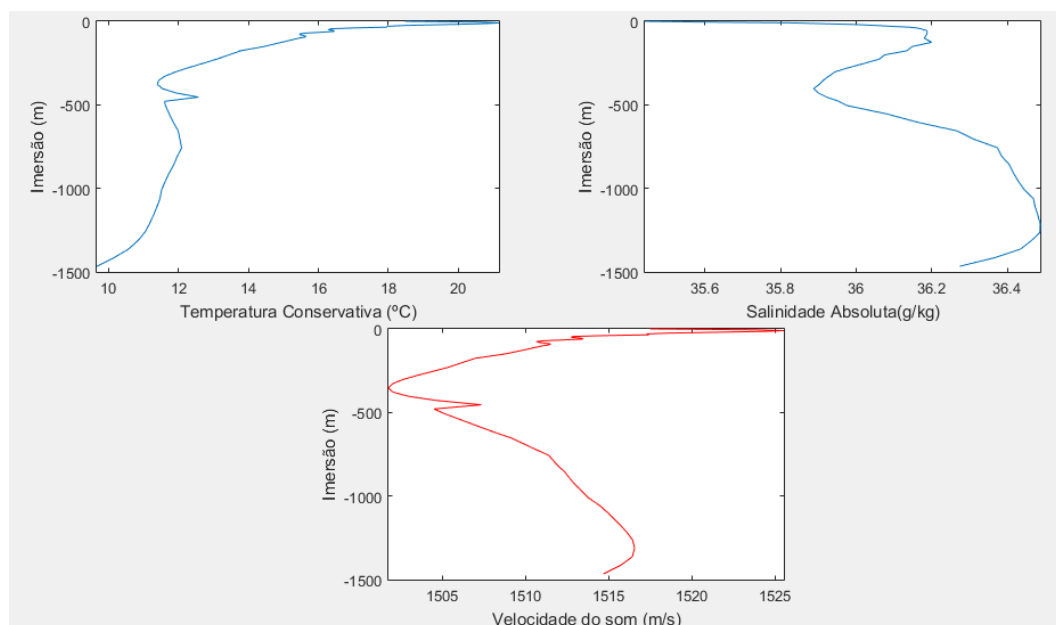


Figura 38: Perfil de temperatura, salinidade e velocidade do som resultante do ficheiro BT, obtido a bordo do NRP "Francisco de Almeida" durante o exercício multinacional SWORDFISH 18, às 12h30 de 22 de junho de 2018, tendo sido completados com a climatologia até à profundidade dessa posição geográfica.

O ficheiro CTD utilizado, para comparação de resultados, foi recolhido a bordo do NRP "Zarco", na baía de Cascais, no âmbito académico da disciplina de Oceanografia Costeira. A recolha de dados teve o seu começo às 09h59 de 27 de abril de 2019, na posição geográfica 38,6° N e 009,5° W. O perfil atingiu a imersão de 50 m.

Relativamente às condições meteorológicas, durante o exercício, apesar de recolhidas no diário de navegação de bordo, foram consideradas as mesmas que a do ficheiro BT para comparação de resultados, o que a nível de perfis não implicará alterações (apenas na previsão sonar as condições meteorológicas limitarão os resultados obtidos), ou seja: vento de oeste com velocidade de 10 nós e vaga de oeste com altura de 0,5 metros (correspondendo ao estado do mar 2). Com a informação proveniente de levantamentos hidrográficos determinou-se que o fundo seria predominantemente de areia fina. Na **Figura 39** está representado o perfil obtido deste ficheiro.

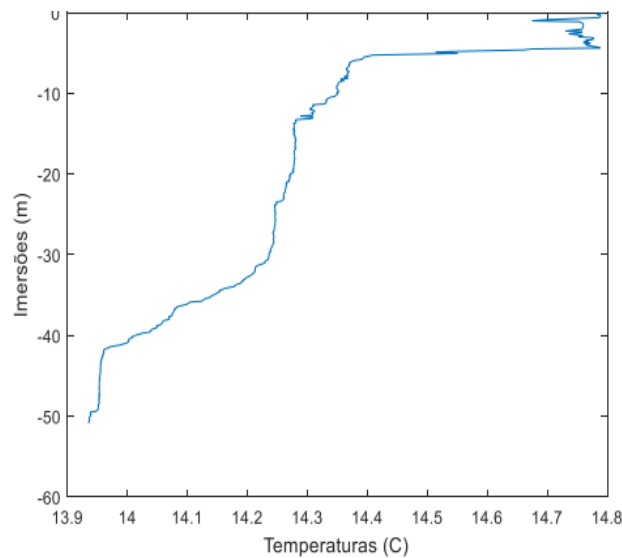


Figura 39: Perfil de temperaturas resultante do ficheiro do CTD, obtido a bordo do NRP "Zarco" durante o embarque de fim de semana da Escola Naval, na baía de Cascais, pelas 09h59 (A) de 27 de abril de 2019.

Relativamente à climatologia, para a sua utilização o operador deve inicialmente seleccionar a base de dados que pretende utilizar, quer a nível da resolução (1° ou $1/4^\circ$), quer se esta é anual, mensal ou dependente das estações do ano, devendo essa escolha ser efetuado no menu base de dados, tal como indicado na **Figura 40**.

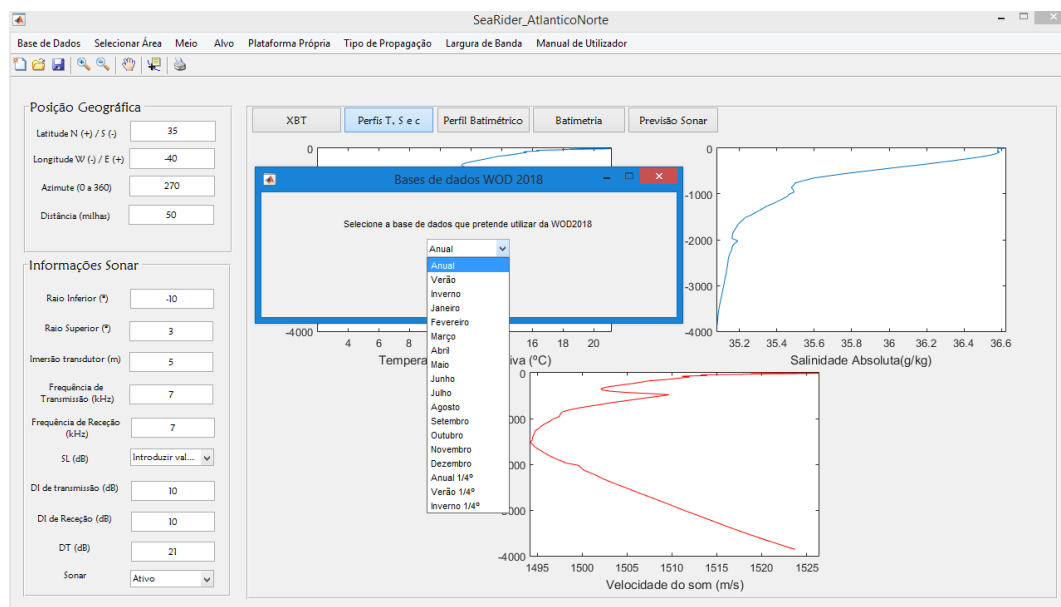


Figura 40: Seleção da base de dados climatológicos para a obtenção dos perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som, para a posição geográfica selecionada pelo operador da ferramenta operacional.

Para a análise da climatologia e dos perfis obtidos, utilizando as bases de dados da WOD18, foi inicialmente utilizada a base anual, visto que esta apresenta um maior volume de dados disponível em função das imersões. Na **Figura 41** está representado os perfis da resolução de 1° para o Atlântico Norte.

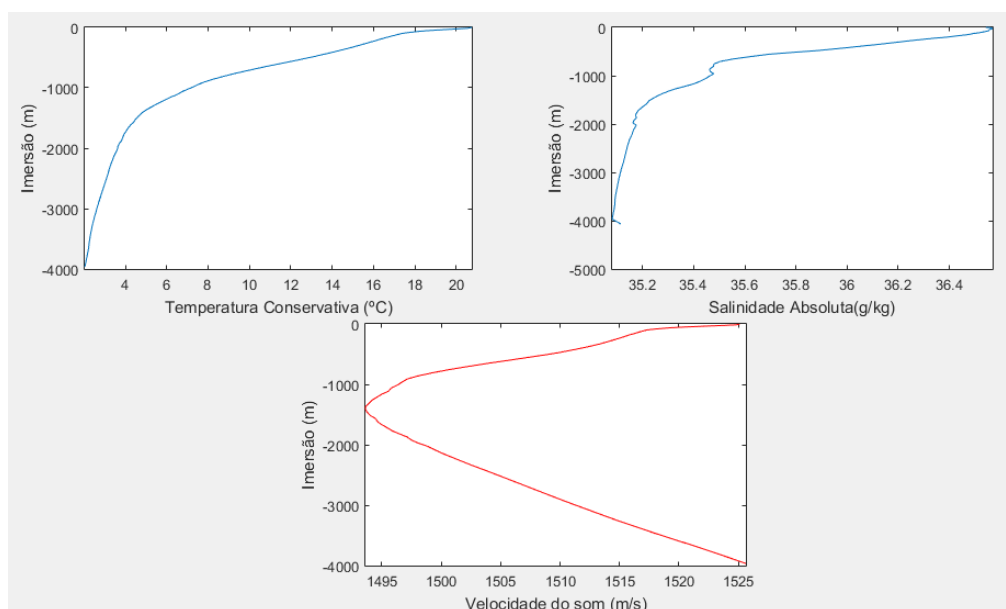


Figura 41: Perfis obtidos das bases de dados climatológicos da WOD18 anual, com a resolução de 1°, na posição geográfica 36,9° N e 39,9° W.

Pretende-se realizar uma comparação entre a base anual, sazonal e mensal, tendo-se para tal selecionado o mês de junho, aproveitando o ficheiro BT recolhido a bordo do NRP “Francisco de Almeida” que data deste mês de 2018, para também permitir aferir sobre quais os dados que se devem preferencialmente utilizar. Na **Figura 42** são apresentados os perfis para a base de dados de verão.

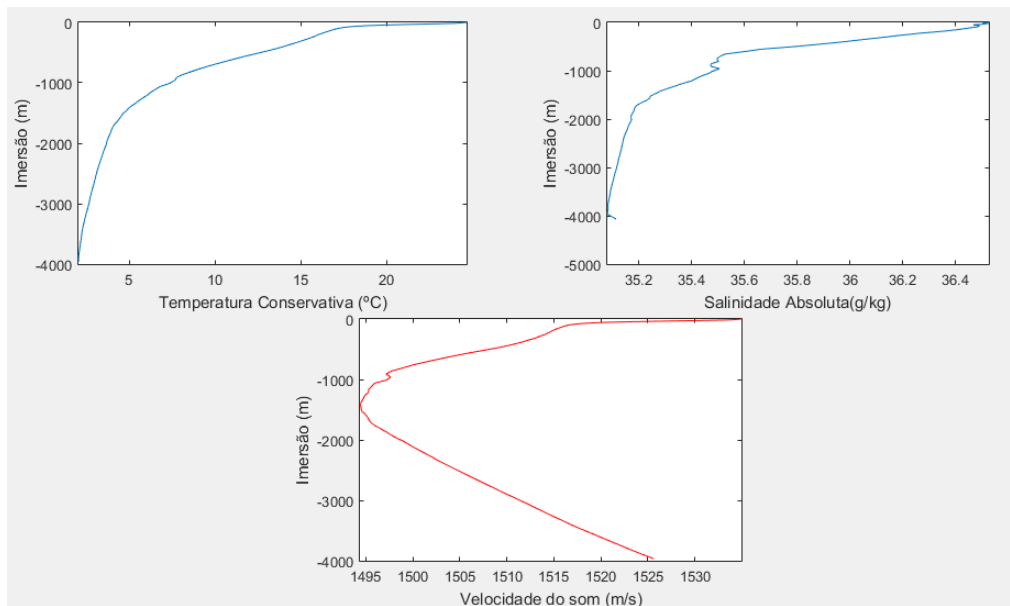


Figura 42: Perfis obtidos das bases de dados climatológicas da WOD18 de verão, com a resolução de 1° , na posição geográfica $36,90^\circ$ N e $39,90^\circ$ W.

Relativamente à base de dados mensal, na **Figura 43**, são apresentados os perfis para o mês de junho. O critério para esta seleção foi a data da realização do exercício SWORDFISH 18, o que permite aferir sobre quais os dados climatológicos de entrada que permitem previsões sonares mais rigorosas. As climatologias mensais não excedem a imersão de 1.500 m.

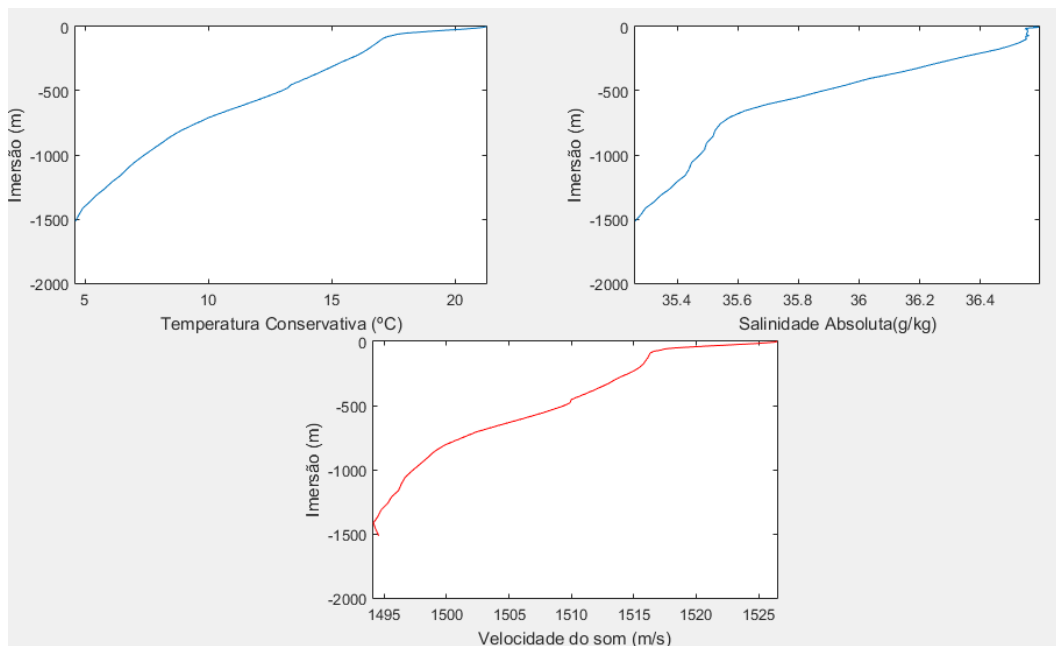


Figura 43: Perfis obtidos das bases de dados climatológicas da WOD18 de junho, com a resolução de 1° , na posição geográfica $36,9^\circ$ N e $39,9^\circ$ W.

Da avaliação dos perfis mencionados na **Figura 43**, relativos a 36,9° N e 39,9° W pode notar-se: a) franca diminuição da temperatura, com a imersão, inerentes à termoclina sazonal e à termoclina permanente (esta presente até cerca de 1.500 m); b) diminuição da salinidade com a imersão até cerca de 2.000 m, estabilizando dessa imersão até ao fundo; c) diminuição da velocidade do som com a imersão, até cerca de 1.500 m, passando a aumentar a partir dessa imersão, consistente com a existência de canal SOFAR (*Sound Fixing And Ranging*, em inglês) centrado nos 1.500 m.

Do ponto de vista operacional à climatologia, no caso a da WOD2018, deve sobrepor-se os dados que sejam colhidos, no início e durante as operações no local de operações, com XBT ou XSV ou BT ou CTD, de modo a melhor representarem a estrutura vertical das propriedades físicas da água do mar, em particular da velocidade do som, pelo menos até à base da termoclina sazonal (até cerca de 140 m, no máximo). O CTD disponível atualmente na Escola Naval está limitado até à imersão de 100 m. Visto que o XBT relativamente à climatologia representa melhor as variações de temperatura e salinidade, que caracterizam as imersões até à termoclina sazonal, produzindo perfis mais realistas e previsões mais rigorosas. Daí que preferencialmente se deva optar pelo XBT sobreposto à climatologia, apesar desta ser sempre uma ferramenta importante perante a impossibilidade de utilizar sondas.

3.2. Comparação entre Métodos de Cálculo de Perdas de Transmissão

Como já foi referido no início do **Capítulo 3**, existem no programa SeaRider dois métodos para o cálculo das perdas de transmissão. Os mesmos serão comparados ao longo deste subcapítulo, no sentido de avaliar qual deverá ser aplicado.

Tendo em conta as conclusões retiradas do subcapítulo anterior, para as “corridas” teste efetuadas, considerou-se o perfil do ficheiro BT obtido a bordo do NRP “Francisco de Almeida”, sendo o mesmo completado pela base de dados da WOD18 anual com resolução de 1°. Na **Tabela 10** são apresentados os parâmetros de entrada para os testes realizados aos métodos de cálculo de TL.

<i><u>Parâmetro</u></i>	<i><u>Valor Introduzido</u></i>
Raio inferior	-10°
Raio superior	3°
Imersão do transdutor	5 metros
Frequência de transmissão/receção	7 kHz
Nível de emissão (SL)	210 dB
Índex de diretividade (DI) de transmissão/receção	10 dB
Modo de operação sonar	Ativo
Limiar de deteção (DT)	21 dB
Estado do mar	SS0
Potencial de hidrogénio (pH)	8
Densidade de navegação	Baixa
Precipitação	Inexistente
Fundo do mar	Areia com rocha
Índice de refletividade (IS) do alvo	5 dB
Largura de banda	0,5 kHz

Tabela 10: Parâmetros de entrada no SeaRider para análise dos resultados dos métodos para o cálculo das perdas de transmissão.

Os parâmetros de ruído próprio e de ruído ambiente não são apresentados na tabela anterior, visto que o seu cálculo é realizado automaticamente pela ferramenta a partir dos valores mencionados na **Tabela 10**.

Após a introdução destes dados de entrada, selecciona-se o método de cálculo das perdas de transmissão, no menu existente para o efeito. Este menu é apresentado na **Figura 44**.

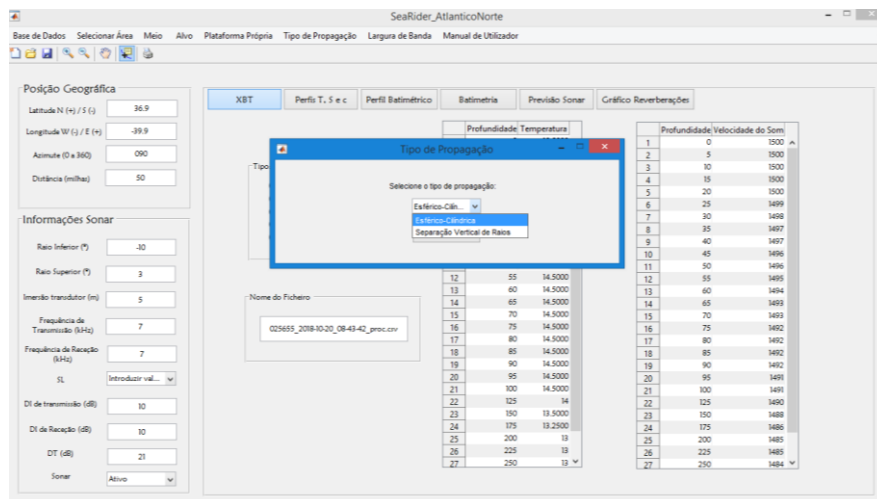


Figura 44: Seleção do método de cálculo das perdas de transmissão, para a realização da previsão sonar e respetiva análise.

Primeiro, será realizada a previsão sonar para a separação vertical de raios, sendo que neste método as perdas de transmissão entre a fonte e qualquer ponto pertencente ao diagrama de raios podem ser determinadas através do espaçamento vertical entre raios que são projetados, a incrementos verticais de um grau na fonte, e que relativamente ao alvo ou pontos de controlo em estudo se irão propagar, ao longo da distância, a intervalos verticais variáveis. Na **Figura 45** são apresentados os resultados obtidos da função *raytrace* e da previsão sonar.

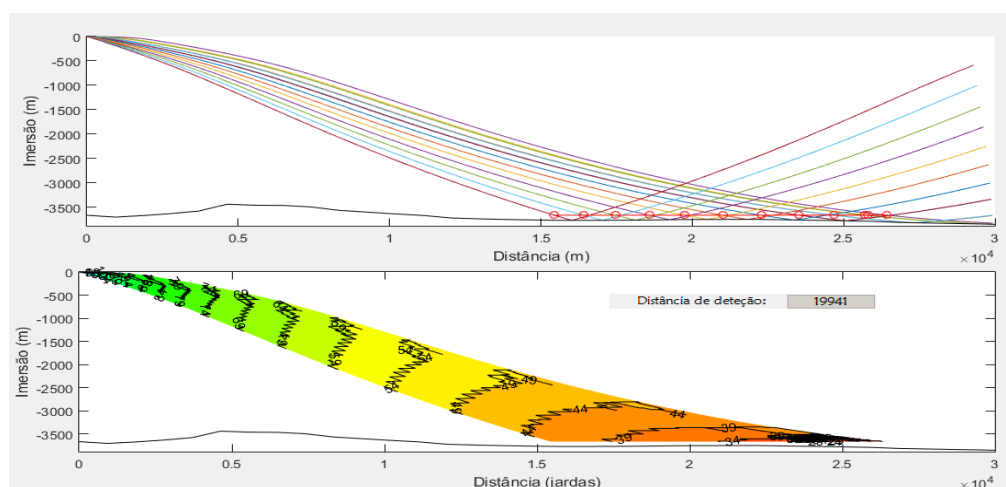


Figura 45: Previsão sonar e alcance de deteção, utilizando a separação vertical de raios para a determinação das perdas por transmissão.

Para a dispersão esférico-cilíndrica o utilizador poderá introduzir um fator designado de *beta*, o qual indica se a dispersão se aproxima mais da esférica ($\beta = 2$) ou da cilíndrica ($\beta = 1$); para efeitos de teste considerou-se $\beta = 1,65$, resultando a previsão sonar da **Figura 46**.

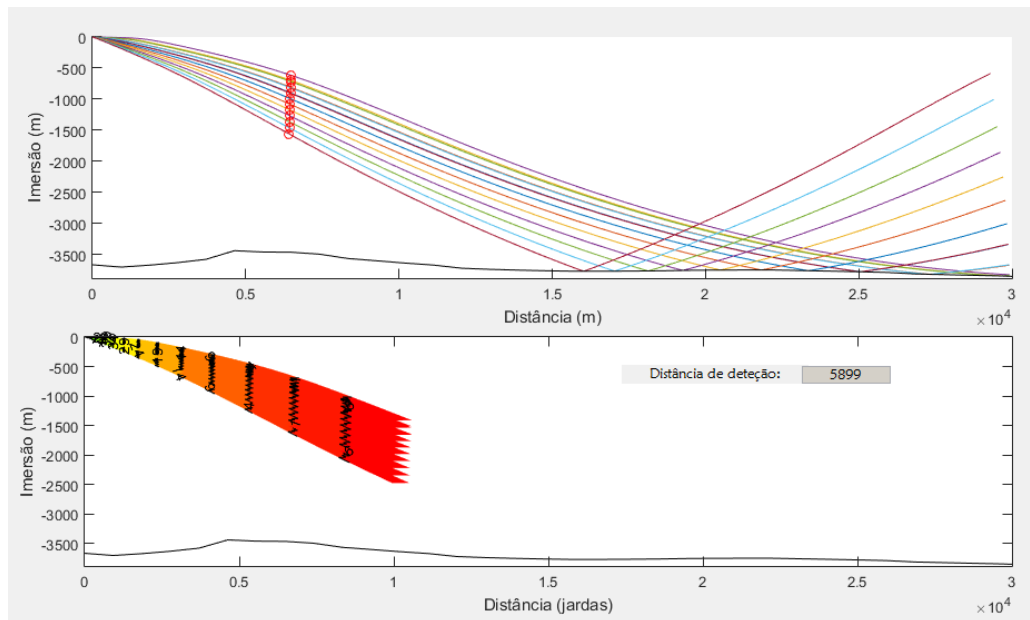


Figura 46: Previsão sonar e alcance de deteção, utilizando a propagação esférico-cilíndrica, com $\beta = 1,65$ para a determinação das perdas por transmissão.

Relativamente ao alcance de deteção, na separação vertical de raios a deteção é possível até à primeira interação com o fundo (sendo igual a 21.290 metros), enquanto na esférico-cilíndrica é bastante inferior (sendo apenas de 6.451 metros), estando bastante distante da primeira interação com o fundo.

O excesso de sinal assume, nesta experiência, valores inferiores para a propagação esférico-cilíndrica, significa isso que as perdas para este método são superiores. Naturalmente este é um teste pontual, sendo normal que noutras posições geográficas, com condições ambientais e de propagação diferentes, a relação de valores entre ambos os tipos de dispersão, seja diversa.

3.3. Comparação entre Modos de Operação do Sonar

Para os modos de operação do sonar (ativo ou passivo) existem equações sonar distintas, resultando em alcances de deteção diferentes, sendo as mesmas apresentadas de seguida.

$$SE = SL - 2TL + TS - NL \text{ ou } RL + DI - DT \quad (\text{sonar ativo})$$

$$SE = SL - TL - NL + DI - DT \quad (\text{sonar passivo})$$

No sentido de avaliar os alcances de detecção e contra detecção, foram aplicados os mesmos dados de entrada com modos de operação distintos. Na **Figura 47** são apresentadas as funções de *raytrace* e de excesso de sinal para o sonar a operar em modo de passivo. Em ativo os resultados foram já apresentados, na **Figura 46**.

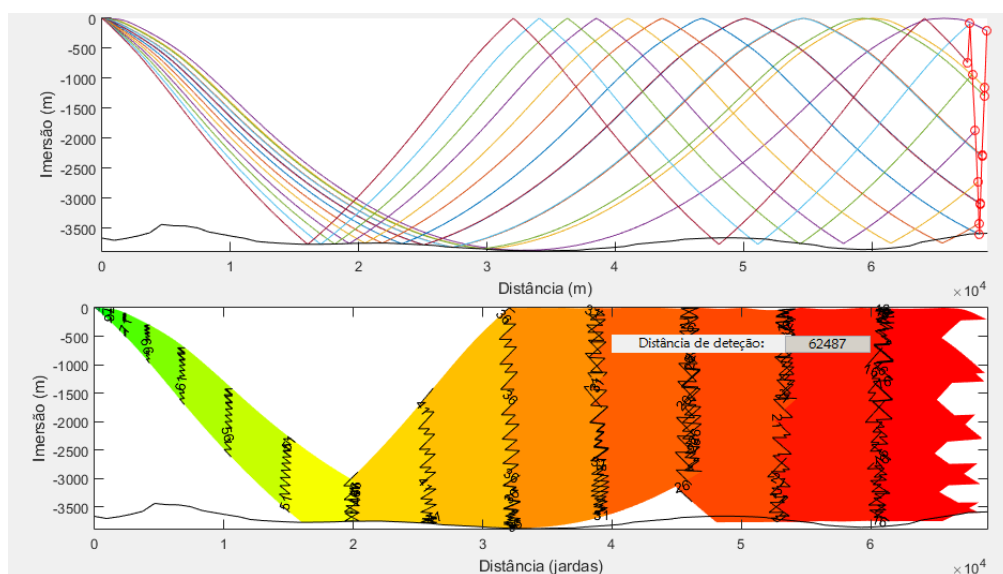


Figura 47: Previsão sonar e alcance de detecção, utilizando a propagação esférico-cilíndrica, com $\beta = 1,65$, com o sonar a operar em modo passivo.

Assim, no modo passivo os alcances são bastante superiores, sendo a explicação para tal as próprias equações para obtenção de excesso de sinal. A do ativo depende do dobro das perdas de transmissão (enquanto o modo passivo apenas depende das perdas, ou seja, o valor é multiplicado apenas por um), e das próprias reverberações, cujo fenómeno não ocorre para a contra detecção.

3.4. Influência dos Diversos Parâmetros para a Previsão Sonar

Nesta secção será definida a influência que cada um dos parâmetros possui sobre a previsão sonar, permitindo uma análise dos resultados obtidos e explicando ao utilizador de que modo as condições encontradas no momento e local em que é empregue a ferramenta operacional SeaRider afetam os alcances. Na **Tabela 11** está explicada, de modo qualitativo, a influência na previsão sonar de um aumento em cada um dos parâmetros utilizados pelo SeaRider para resolver as equações sonares.

A **Tabela 11** ilustra os resultados que o operador do programa irá obter se alterar os valores iniciais de entrada que foram estabelecidos para as corridas teste efetuadas neste capítulo.

<i><u>Parâmetro</u></i>	<i><u>Consequência na Previsão Sonar</u></i>
Raio inferior	Apenas influencia as coordenadas horizontais e verticais dos raios
Raio superior	Apenas influencia as coordenadas horizontais e verticais dos raios
Imersão do transdutor	Apenas influencia as coordenadas horizontais e verticais dos raios
Frequência de transmissão/receção	Diminui o alcance de deteção e contra deteção
Nível de emissão (SL)	Aumenta o alcance de deteção e contra deteção
Índice de diretividade (DI) de transmissão/receção	Aumenta o alcance de deteção e contra deteção
Modo de operação sonar	Ativo (menor alcance) Passivo (maior alcance)
Limiar de deteção (DT)	Diminui o alcance de deteção e contra deteção
Estado do mar	Diminui o alcance de deteção e contra deteção
Densidade de navegação	Diminui o alcance de deteção e contra deteção
Precipitação	Diminui o alcance de deteção e contra deteção alcance de deteção e contra deteção
Fundo do mar	Quanto maior o valor em dB da reflexão, menor
Índice de refletividade (TS) do alvo	Aumenta o alcance de deteção e contra deteção
Largura de banda	Diminui o alcance de deteção e contra deteção
Velocidade própria	Diminui o alcance de deteção e contra deteção

Tabela 11: Influência que dos diversos parâmetros das equações do excesso de sinal têm sobre os alcances de deteção e contra deteção, com aumentos dos parâmetros.

3.5. Corridas de Testes para Diversas Posições Geográficas de Interesse

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos para diversas posições geográficas consideradas de interesse, tendo sido selecionadas por serem representativas da plataforma continental e talude continental, rifte oceânico (crista dorsal) e da planície abissal. Pretende-se analisar que influência o perfil batimétrico e os perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som assumem perante os alcances de deteção e contra deteção. As posições selecionadas e o interesse que relevam são apresentados na **Tabela 12**.

<i><u>Posição Geográfica</u></i>	<i><u>Interesse</u></i>
39,8 ⁰ N e 009,5 ⁰ W	Plataforma continental, com profundidades baixas. A temperatura encontra-se na média do Oceano Atlântico Norte
10,0 ⁰ N e 023,5 ⁰ W	Planície abissal, com profundidades elevadas e aproximadamente constantes. Próxima do equador tendo temperaturas à superfície bastante superiores à média
36,9 ⁰ N e 011,9 ⁰ W	Talude continental, com declive de profundidade elevado. As temperaturas correspondem à média. Existência de massa de água mediterrânica em níveis intermédios; canal de som SOFAR dividido em superior e inferior
36,9 ⁰ N e 024,8 ⁰ W	Crista oceânica, sendo observável o decréscimo da velocidade do som desde a superfície até à base da termoclina e, para baixo desta o aumento com a profundidade ou pressão. A nível da temperatura e salinidade nada a destacar

Tabela 12: Posições geográficas utilizadas para as corridas teste e seu interesse no âmbito da previsão sonar.

Relativamente à primeira posição geográfica selecionada (39,8⁰ N e 009,5⁰ W), esta é representativa da plataforma continental, presente em praticamente todo o mar costeiro, junto das costas continentais, apresentando um declive suave e profundidades até cerca de 150-200 metros no bordo da plataforma, terminando no lado do alto mar com o talude ou vertente continental. Na **Figura 48** é possível observar o perfil batimétrico da plataforma

continental até à linha de costa. A percepção do declive é iludida pela escala vertical exagerada no gráfico, quando comparada com a escala horizontal.

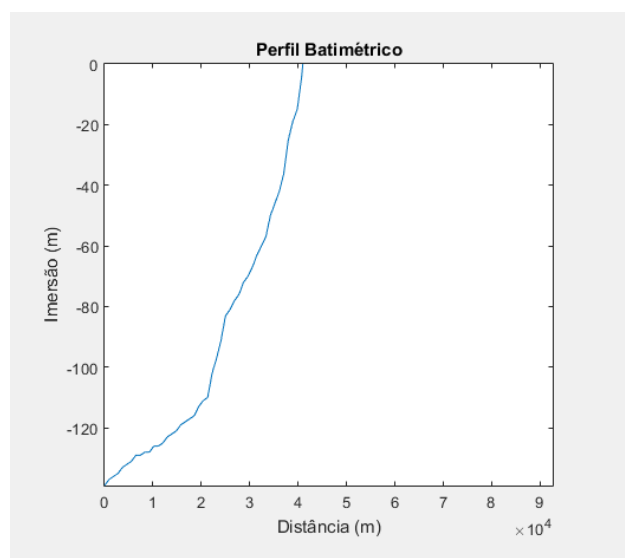


Figura 48: Perfil batimétrico para a posição geográfica $39,8^{\circ}$ N e $009,5^{\circ}$ W, azimute de 090° e para uma distância de 50 milhas náuticas. Para garantir a mesma escala horizontal, todos os gráficos apresentam o perfil batimétrico para 50 milhas náuticas.

O perfil de temperatura apresenta um decréscimo até à profundidade de 500-600 metros, atingindo aproximadamente 11°C em 500 m (tal acredita-se ser um erro pontual das temperaturas, na base de dados WOD18, na posição em questão; para baixo da imersão dos 400 m, há valores crescentes de 11°C até próximo de $11,5^{\circ}\text{C}$ aos 750 m, o que se afigura pouco realista). A salinidade apresenta muito ligeira variação com a imersão, embora a escala horizontal do gráfico iluda maior mudança. No gráfico da velocidade do som, esta diminui da superfície até à imersão dos 400 metros, por efeito da diminuição da temperatura, aumentando desde essa imersão até ao fundo, por efeito do acréscimo da pressão. Estas constatações são observáveis na **Figura 49**.

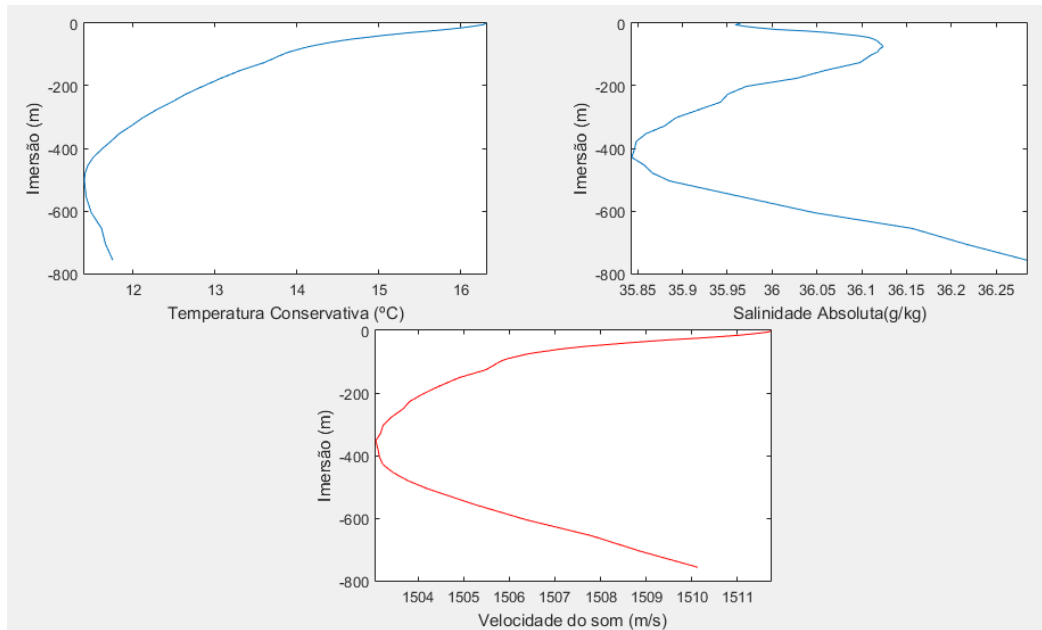


Figura 49: Perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som para a posição geográfica $39,8^{\circ}$ N e $009,5^{\circ}$ W.

O alcance de deteção ativa é de 1.491 metros, bastante inferior aos já mencionados ao longo desta dissertação de mestrado, tal deve-se à menor profundidade e consequentemente a primeira interação ocorrer mais próxima do navio (ver **Figura 50**). Associada a essa interação, são geradas reverberações que influenciam as equações de excesso de sinal e consequentemente o alcance. Nesta figura notam-se propagações erradas sob o fundo, uma vez que na utilização da função “raytrace.m” só é possível resolver reflexão da primeira interação com o fundo.

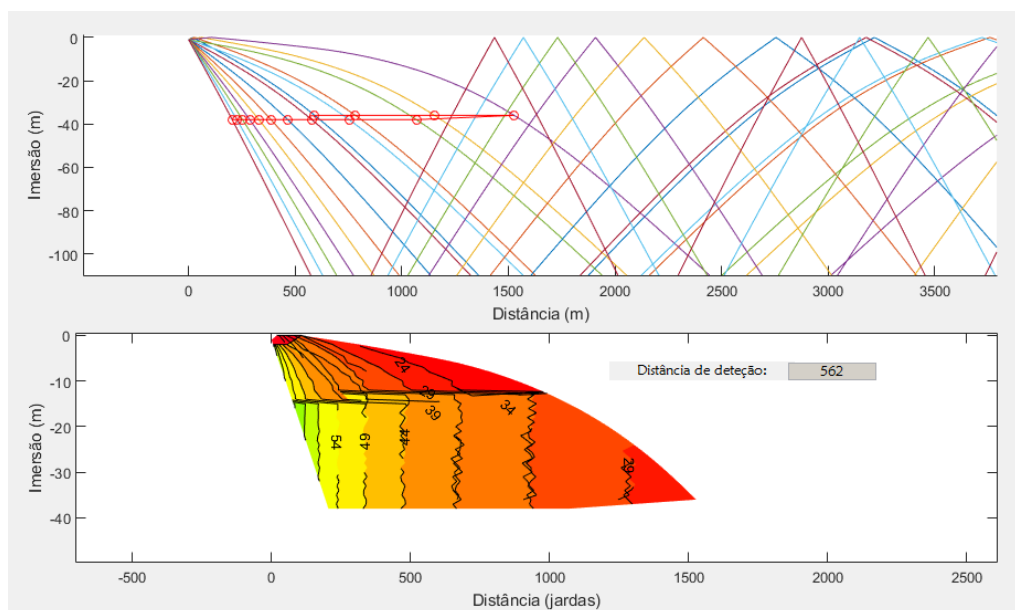


Figura 50: Função *raytrace* e de excesso de sinal, bem como o valor da distância de detecção para a posição geográfica $39,8^{\circ}$ N e $009,5^{\circ}$ W.

Relativamente à posição $10,0^{\circ}$ N e $023,5^{\circ}$ W, que corresponde a uma área marcada por planícies abissais, com profundidades entre 4.000 e 5.000 metros, praticamente sem declive que deva ser considerado, o perfil é apresentado na **Figura 51**.

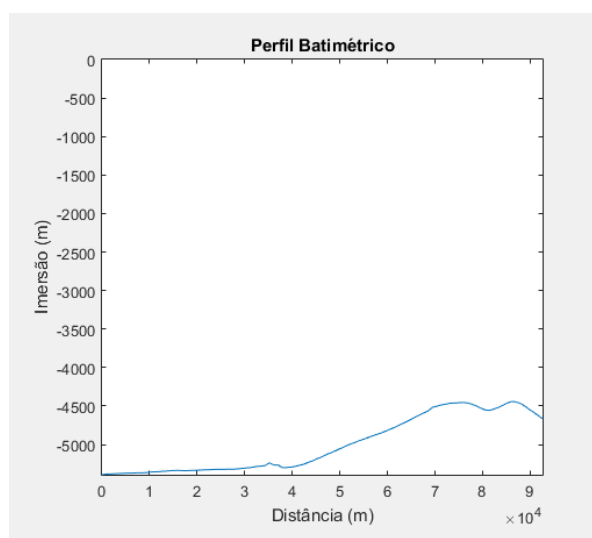


Figura 51: Perfil batimétrico para a posição geográfica $10,0^{\circ}$ N e $023,5^{\circ}$ W, azimute de 090° e para uma distância de 50 milhas náuticas.

O perfil de temperatura apresenta um decréscimo acentuado na termoclina permanente, decrescendo mais suavemente até praticamente 2°C na imersão de 4.000 metros. A salinidade apresenta pequena variação com a imersão, atingindo valor mínimo na imersão de aproximadamente 1.000 m. O gráfico da velocidade do som apresenta uma

diminuição até aos 1.000 metros, na base da termoclina permanente, voltando a aumentar com a imersão ou pressão; pode ser observado na **Figura 52**.

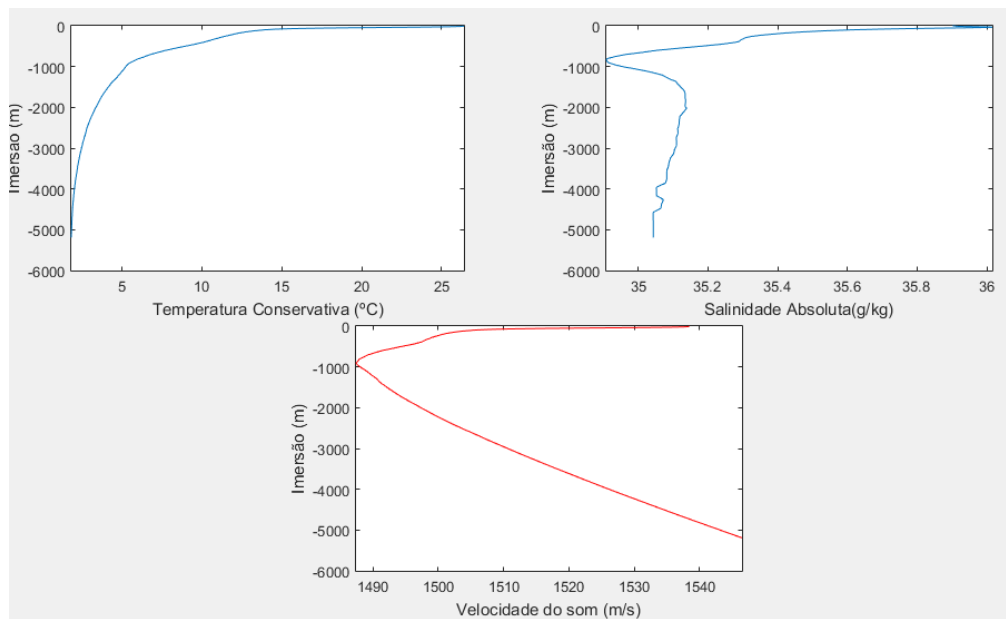


Figura 52: Perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som para a posição geográfica 10,0° N e 023,5° W.

O alcance de deteção ativa é de 6.439 metros, correspondendo a um dos valores mais elevados obtidos nos testes efetuados com esta ferramenta operacional. Tal deve-se à elevada profundidade e consequentemente à não existência de interações com o fundo, sendo escassas as interações com a superfície (**Figura 53**), por elevada estratificação.

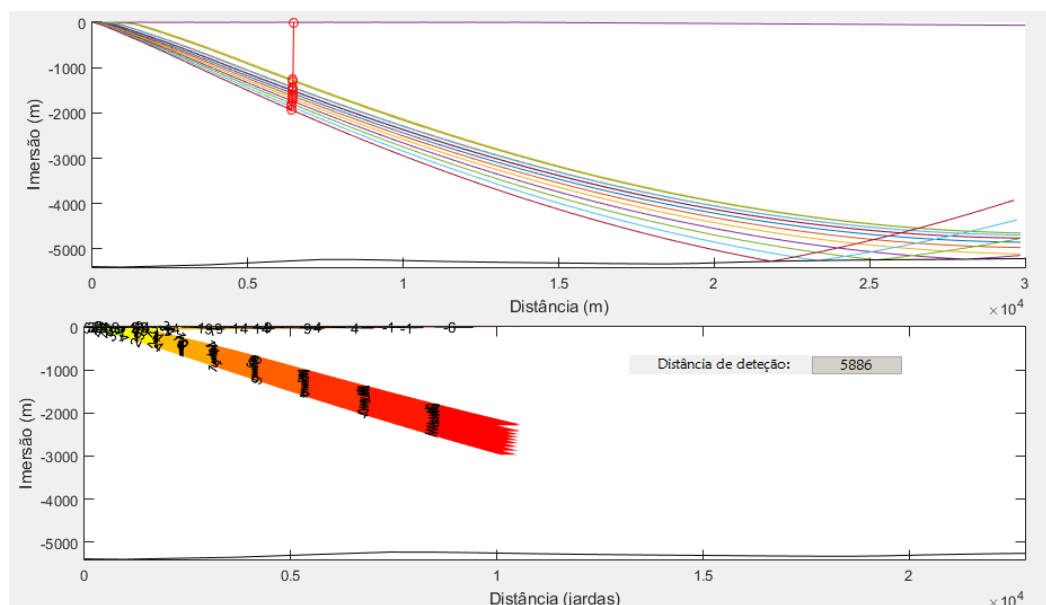


Figura 53: Função *raytrace* e de excesso de sinal, bem como o valor da distância de detecção para a posição geográfica $10,0^0$ N e $023,5^0$ W.

Relativamente à posição $36,9^0$ N e $011,9^0$ W, que corresponde a uma área marcada por taludes ou vertentes continentais, fundos oceânicos que possuem um declive muito pronunciado, sendo a transição entre a plataforma continental, as rampas e planícies abissais. Este perfil é apresentado na **Figura 54**.

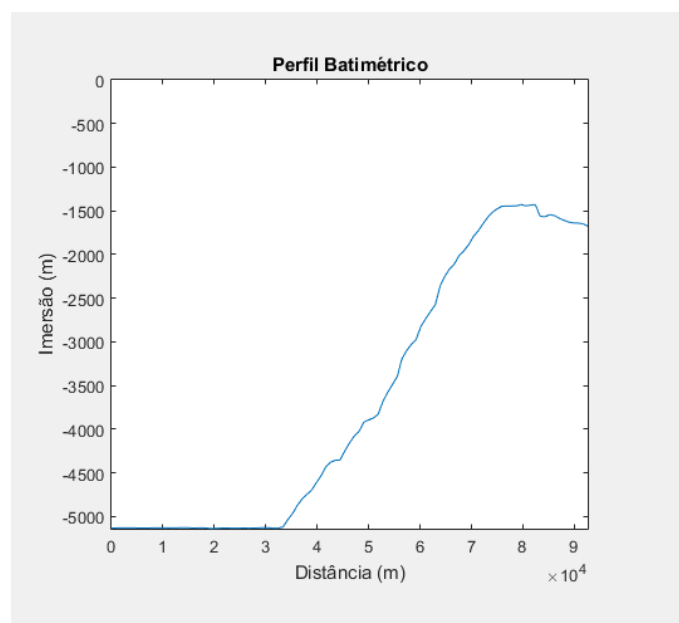


Figura 54: Perfil batimétrico para a posição geográfica $36,9^0$ N e $011,9^0$ W, azimute de 090^0 e para uma distância de 50 milhas náuticas.

Esta posição situa-se ao largo da Costa Oeste de Portugal Continental, onde está bem presente e é notória a massa de água de origem mediterrânica, entre as imersões de 700 e 1.750 m, com núcleo relativamente quente e salino nos 1.000-1.200 metros de imersão, como pode ser notado nos perfis verticais de temperatura e salinidade representados na **Figura 55**. Também nela pode ser notado o perfil vertical da velocidade do som com valor máximo relativo nos cerca de 1.100 metros de imersão, estrutura esta que justifica a presença de canal de som superior (entre a superfície ou base da camada de mistura de superfície e a imersão dos 1.100 metros) e o canal de som profundo desde os 1.100 metros até aos cerca de 3.000 metros (a profundidade conjugada, onde a velocidade do som iguala o seu valor na superfície).

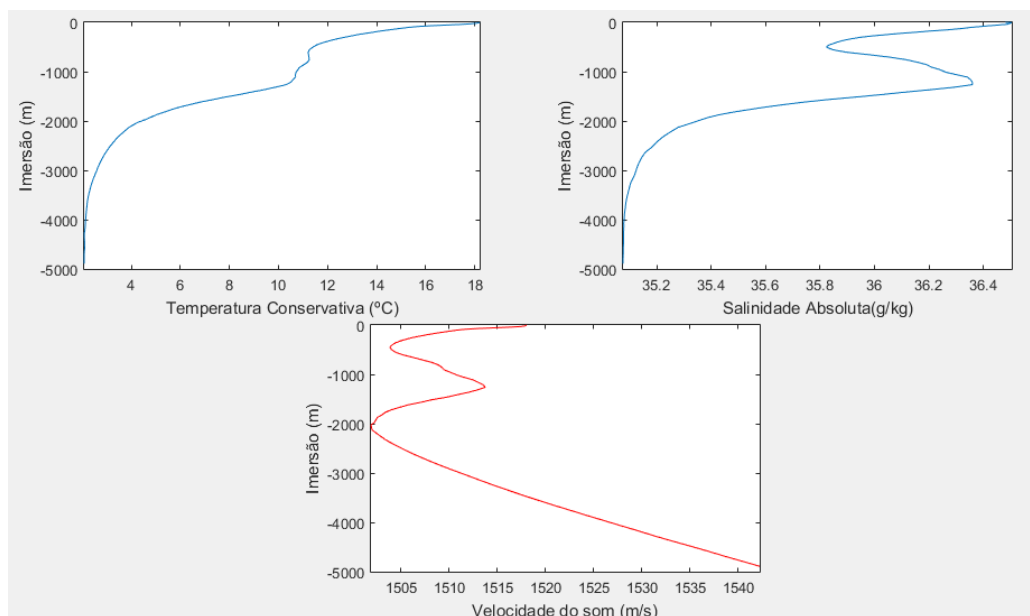


Figura 55: Perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som para a posição geográfica 36,9° N e 011,9° W.

O alcance de deteção ativa é de 6.504 metros, sendo o valor obtido bastante semelhante ao caso anterior, tal deve-se à elevada profundidade e consequentemente à não existência de interações com o fundo, tal como na **Figura 56**.

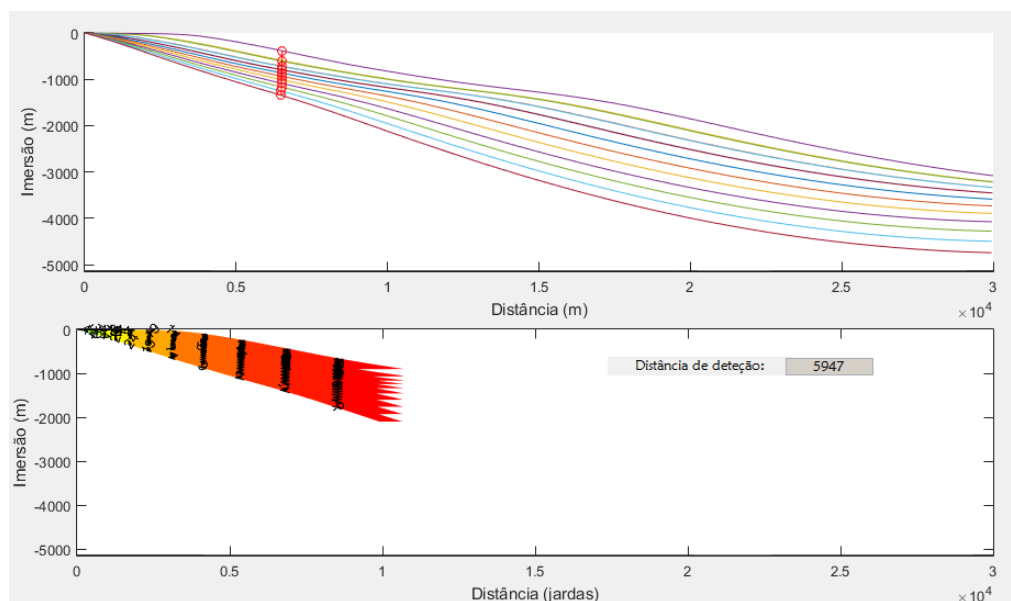


Figura 56: Função *raytrace* e de excesso de sinal, bem como o valor da distância de deteção para a posição geográfica $36,9^{\circ}$ N e $011,9^{\circ}$ W.

A posição $36,9^{\circ}$ N e $024,8^{\circ}$ W, que corresponde a uma área marcada por crista oceânica, próxima das ilhas dos Açores, cadeias de montanhas dos fundos marinhos que resultam do lento afastamento das placas tectónicas, na escala geológica de milhões de anos, levando à formação dessa morfologia de fundos por vulcanismo (*sea floor spreading*) ao longo dessa fronteira de placas tectónicas, ditas do tipo construtivo ou divergente. Este perfil é apresentado na **Figura 57**, no qual pode inclusivamente ser notado no topo da crista dorsal o respetivo vale do rífte (*rift valley*).

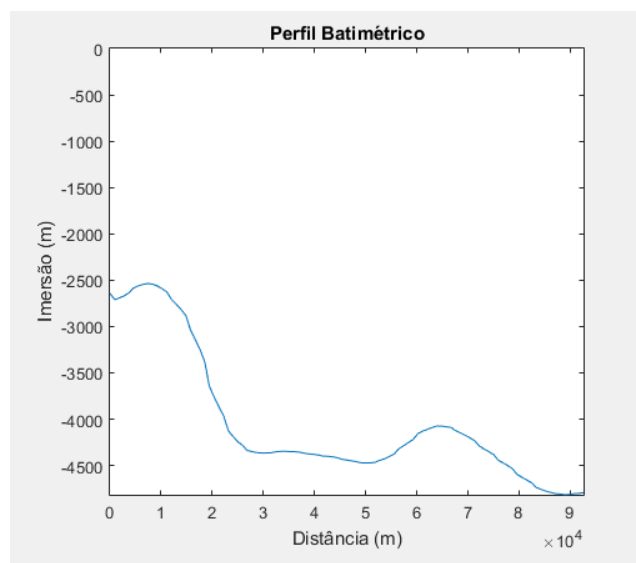


Figura 57: Perfil batimétrico para a posição geográfica $36,9^{\circ}$ N e $024,8^{\circ}$ W, azimute de 270° e para uma distância de 50 milhas náuticas.

O perfil de temperatura apresenta o normal decréscimo com a imersão (termoclina permanente continuada pela “camada isotérmica profunda”), contudo, são menos aplicáveis as mesmas causas do caso anterior. A salinidade tende a diminuir com a imersão, não havendo nada de relevante a salientar, a não ser uma anomalia positiva de salinidades nos 1.000 m de imersão (por efeito de água mediterrânica ainda notada nessa área do Atlântico Norte). O gráfico da velocidade do som diminui até aos 2.000 metros, aumentando daí até ao fundo. Tal é representado na **Figura 58**.

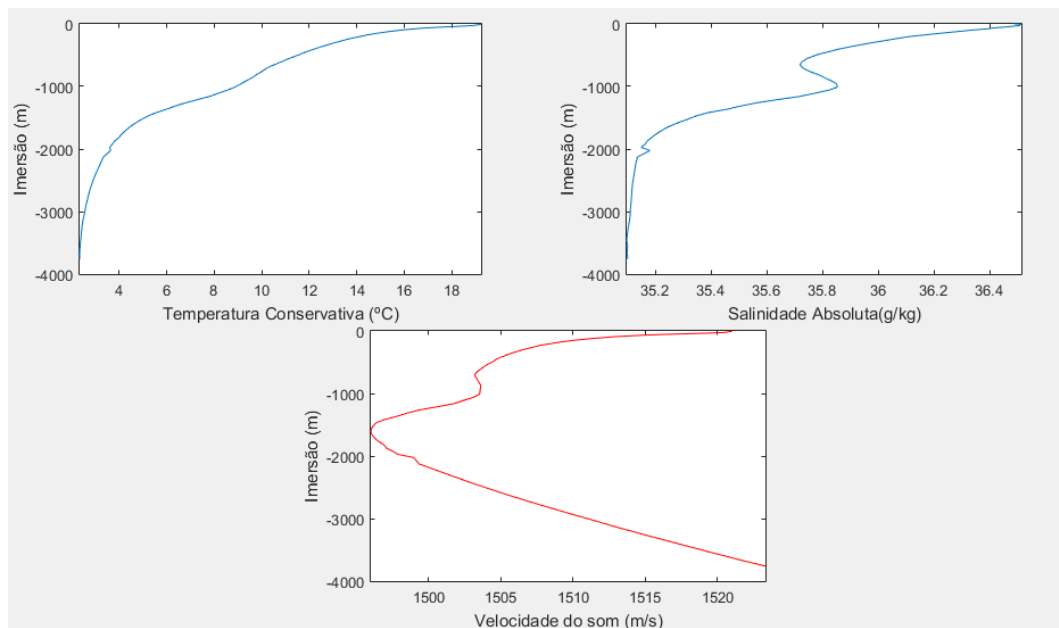


Figura 58: Perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som para a posição geográfica 36,9° N e 024,8° W.

O alcance provável de deteção ativa é de 6.437 metros, sendo o valor obtido bastante semelhante ao caso anterior; o excesso de sinal é igual a zero antes de ocorrer a primeira interação com o fundo (**Figura 59**).

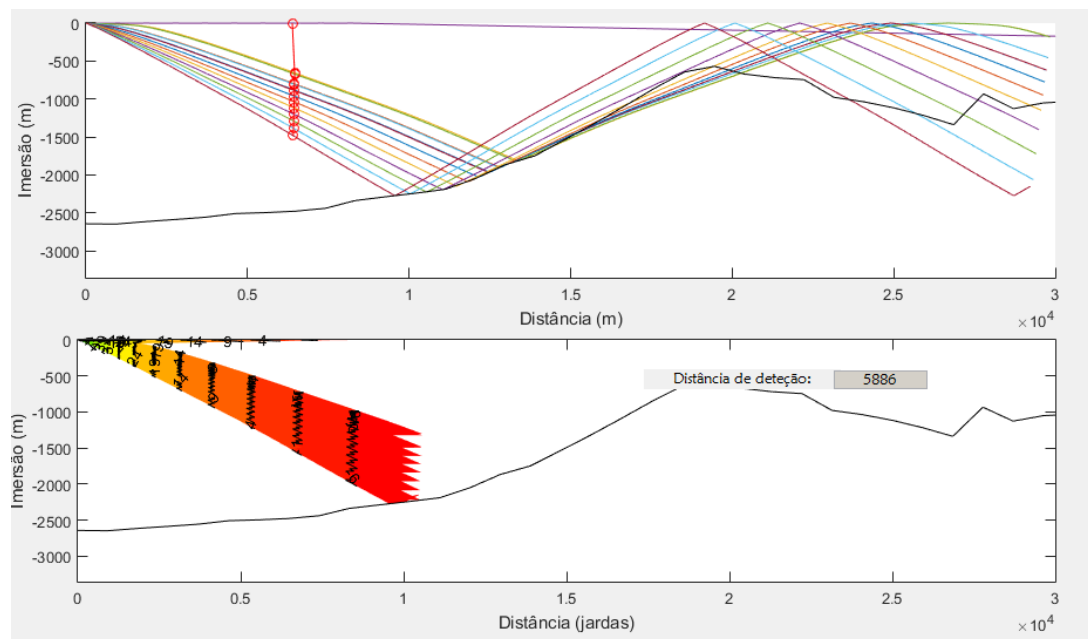


Figura 59: Função *raytrace* e de excesso de sinal, bem como o valor da distância de deteção para a posição geográfica de $36,9^{\circ}$ N e $024,8^{\circ}$ W.

Capítulo 4. Comparação entre FAPSO, *Raypath* e SeaRider

No planeamento das operações ASW e respetivos exercícios, um dos principais fatores considerados é a previsão sonar, no sentido de se conhecer a posição mais provável do submarino ou até como obter o melhor desempenho dos sensores existentes a bordo dos navios.

Pela especificidade do ambiente acústico submarino e da utilização pretendida pela Marinha Portuguesa, apenas se comparou o SeaRider com outros *softwares* militares equivalentes, nomeadamente o FAPSO e o *Raypath 3.0*, tendo sido efetuados a bordo diversos testes, em posições geográficas distintas e com condições diferentes, no sentido de demonstrar a validade desta ferramenta operacional e que vantagens esta oferece relativamente às já existentes.

Tendo em conta a formação que os utilizadores/operadores destas ferramentas operacionais possuem na área da acústica, é necessário que estes sejam de fácil utilização e que os valores de entrada sejam conhecidos sem que, contudo, haja perda de rigor nos cálculos efetuados e nas previsões obtidas.

Assim, o estudo e comparação das ferramentas baseou-se em cinco pontos que se consideraram fundamentais: introdução e leitura de parâmetros ambientais e características técnicas dos equipamentos acústicos; modelo de propagação; cálculo de excesso de sinal; deteção passiva; e capacidade de emprego operacional.

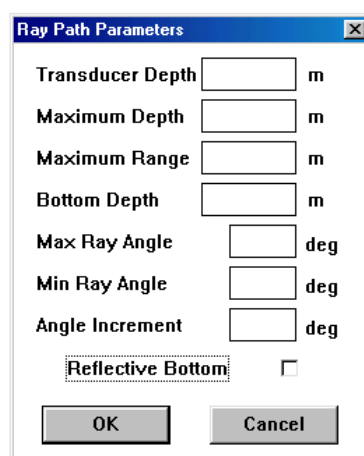
4.1. *Raypath 3.0*

Esta ferramenta operacional foi desenvolvida pela Marinha Canadiana, no ano de 1996, sendo atualmente o *software* de previsão sonar empregue pela Marinha Portuguesa no contexto da guerra antissubmarina e de seus respectivos exercícios. Apesar de grande parte da física e dos cálculos, neste programa, não serem explicados, procurou-se no manual de utilizador recolher informação para uma análise crítica, sendo aqui apresentados os pontos mais relevantes e que devem ser analisados.

Para o traçado de raios sonoros recorre ao *raytracing*, teoria já explicada ao longo desta dissertação de mestrado, sendo função semelhante à que foi empregue no SeaRider, considerando a propagação dos raios num plano bidimensional, a distância horizontal ao transdutor e a imersão.

Uma das desvantagens deste programa, relativamente ao SeaRider, é a introdução dos perfis de temperatura e/ou velocidade do som manualmente; para serem introduzidos automaticamente é necessário que a sonda utilizada esteja conectada ao sistema batitermógrafo Sippican MK8. Após isto, são inseridos nos vários submenus que compõem o menu opções os diversos parâmetros, nomeadamente os relativos ao *raytracing*, os fatores de escala, os parâmetros da equação sonar e características do *array* sonar considerado.

O submenu *Ray Path Parameter*, apresentado na **Figura 60**, engloba os diversos parâmetros necessários para o cálculo do traçado de raios sonoros, nomeadamente a profundidade no local (o SeaRider não possui este parâmetro, visto que o seu cálculo é efetuado automaticamente através da base de dados GEBCO, tendo em consideração a posição geográfica do navio e o rumo a que navega ou o azimuth pretendido), imersão do transdutor e os raios inferior e superior.



The image shows a Windows-style dialog box titled "Ray Path Parameters". It contains the following controls:

- Transducer Depth: [text box] m
- Maximum Depth: [text box] m
- Maximum Range: [text box] m
- Bottom Depth: [text box] m
- Max Ray Angle: [text box] deg
- Min Ray Angle: [text box] deg
- Angle Increment: [text box] deg
- Reflective Bottom: [checkbox]
- OK button
- Cancel button

Figura 60: Menu do *Raypath* relativo à entrada dos parâmetros para a função *raytracing*.

Da aplicação, no programa, destes dados resulta o gráfico de traçado dos raios sonoros bidimensional, sendo este bastante distinto ao obtido no SeaRider, apesar dos perfis utilizados serem os mesmos. Não foi possível encontrar uma explicação para esta diferença, visto que os métodos utilizados pelo *Raypath* na resolução destes fenómenos não são explicados nem analisados em nenhuma fonte, inclusive o manual de utilização desta ferramenta. O traçado de raios acústicos é apresentado na **Figura 61**.

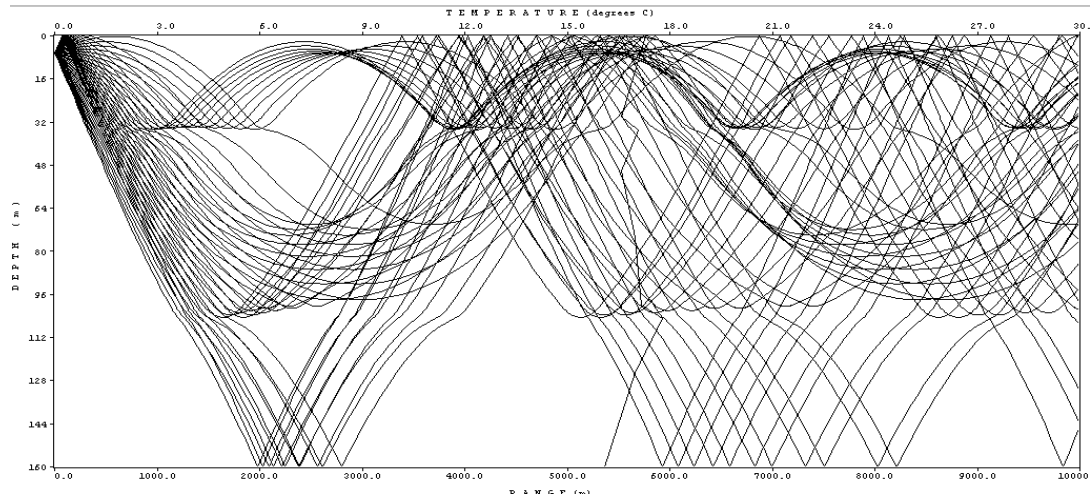


Figura 61: Gráfico do traçado de raios sonoros no *Raypath*, sendo este bidimensional visto que apenas considera a distância horizontal ao transdutor e a imersão.

Relativamente às equações sonar, no *Raypath* também existe um submenu dedicado à entrada destes parâmetros, designado de *prediction parameters*, cujo *layout* é apresentado na **Figura 62** e onde são inseridos o índice de diretividade, nível de intensidade acústica, o limiar de deteção, nível de ruído e o índice de refletividade. A frequência de operação do equipamento acústico também é aqui introduzida, bem como a modelação das perdas de transmissão, atribuindo um valor às perdas devido à interação com o fundo e a superfície.

Figura 62: Submenu *Prediction Parameters*, onde são introduzidos os diversos parâmetros das equações sonar.

O submenu *sonar array options*, apresentado na **Figura 63** permite definir os diversos parâmetros do *array* de hidrofones, nomeadamente através da introdução do número de hidrofones da coluna e o espaçamento entre eles. É possível colocar apenas um único hidrofone a emitir em modo omnidireccional ou considerar o dito *array* de hidrofones já com a direccionalidade associada aos mesmos.

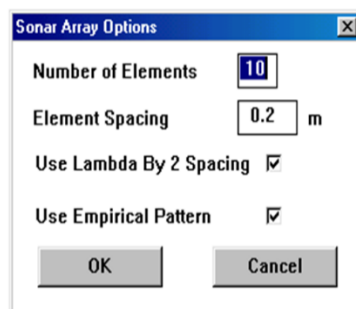


Figura 63: Submenu *sonar Array Options*, com a possibilidade de inserir apenas um hidrofone omnidireccional ou um *array* de hidrofones.

Finalmente, existe um último submenu com as definições de escala dos perfis de temperatura, que podem ser modificados pelo operador, sendo de salientar o número de pontos intermédios relativos ao perfil inicial inserido e a regra de interpolação que se pretende utilizar. Este menu é apresentado na **Figura 64**.

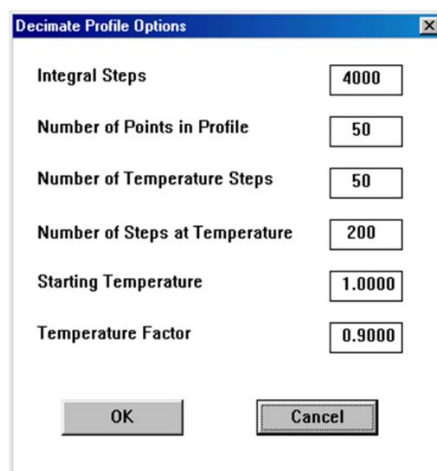


Figura 64: Submenu *Decimate Profile Options*, permite alterar os pontos intermédios do perfil de temperatura e a regra de interpolação pretendida.

Tendo em conta todos os dados seleccionados e parâmetros introduzidos, este calcula o excesso de sinal e determina os alcances de deteção ou contra deteção. Na **Figura 65** é apresentado o gráfico de excesso de sinal.

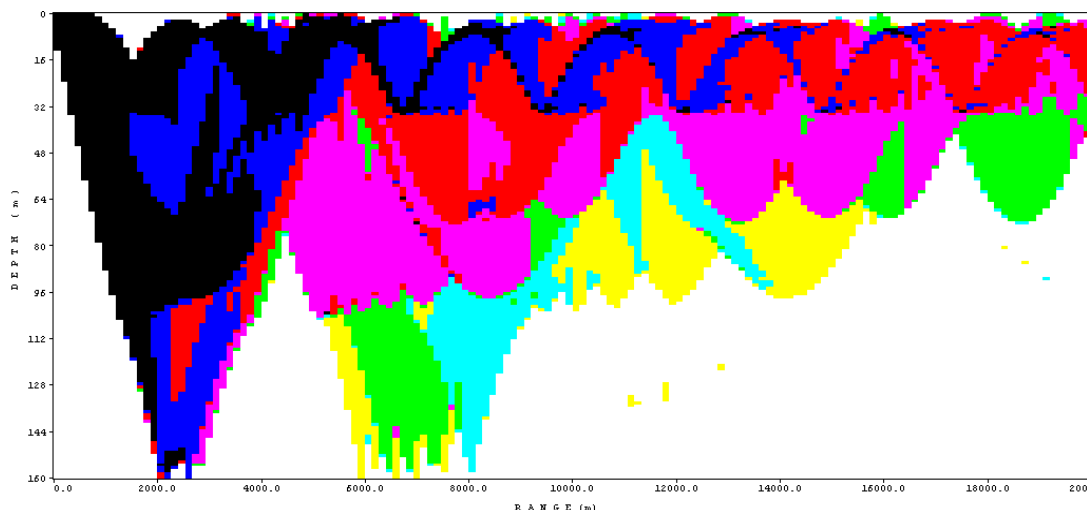


Figura 65: Gráfico de excesso de sinal, sendo o gradiente de cores correspondente a alterações de 15 dB. Este gráfico permite determinar o alcance sonar.

4.1.2. Análise do *Raypath 3.0*

Esta ferramenta operacional é empregue por diversas marinhas, visto a sua facilidade de utilização e ao modo simples com que resolve os diversos fenómenos acústicos observáveis no ambiente submarino. Apesar de o seu principal objetivo ser o meio operacional, fornecendo previsões sonar aplicáveis nos diversos exercícios da guerra anti-submarina, este também tem aplicabilidade académica visto ser independente da ligação aos sensores de bordo.

Será agora feita uma análise do mesmo, tendo em conta os cinco fatores principais mencionados anteriormente. Começando pela introdução dos dados do perfil de temperatura ou velocidade do som, esta operação pode ser efetuada de modo manual ou automático, dependendo da existência a bordo do sistema batitermógrafo Sippican MK8, também permite fazer alterações ao perfil inicial, suavizando alterações bruscas no perfil ou até mesmo introduzir temperaturas pretendidas nos vários pontos que constituem os perfis de temperatura selecionados. Contudo, a introdução dos diversos parâmetros do equipamento acústico utilizado, do navio e das condições meteorológicas e oceanográficas prevaletentes, que influenciam os valores do nível de ruído ambiente, o ruído próprio, as perdas por transmissão e o nível de intensidade ou as perdas por interação com a superfície e/ou fundo, não são calculadas automaticamente, sendo necessário o operador conhecer o seu valor em dB. Para além disso, não considera a influência do vento, precipitação, estado do mar ou densidade de navegação. Relativamente às características técnicas do sonar,

apenas é possível definir, tal como já foi referido, o número de hidrofones na coluna de *array*, o espaçamento entre eles e a sua frequência de operação, limitando assim o cálculo do índice de diretividade, sendo necessário a sua introdução pelo operador.

Para o traçado de raios sonoros utiliza o *raytracing*, à semelhança de outras ferramentas operacionais deste género, sendo necessário que o utilizador defina qual a abertura angular dos raios, assim como o seu incremento angular, bem como a profundidade máxima na área de operações (que muitas vezes não é conhecido, visto que não existe um perfil batimétrico estabelecido), já os fatores de escala do gráfico não podem ser modificados, ao contrário do SeaRider.

O cálculo do excesso final é algo ambíguo, se por um lado a pequena quantidade de parâmetros considerados facilita a sua utilização, por outro reduz a confiança nos resultados obtidos, uma vez que o rigor acaba por não ser conseguido. Um bom exemplo foi o já referido nível de ruído, em que não é considerado o ruído ambiente e o ruído próprio, mas sim apenas um valor único, que nem sempre é conhecido pelo operador. Também não é considerada a largura de banda, pelo que o nível de ruído de entrada é o de banda.

Relativamente aos valores do índice de diretividade, índice de refletividade do alvo, limiar de deteção e as perdas por interação devem ser introduzidos pelo operador, implicando que estes denominem os diversos fenómenos da acústica, o que nem sempre acontece.

Para o modo de operação do sonar passivo, o *Raypath* considera que o ruído emitido por uma outra plataforma é modulado como o modo de operação ativo, ou seja que o índice de diretividade e limiar de deteção é o mesmo, com os hidrofones a operar na mesma banda, e que o navio está a tentar detetar, aproximação que é designada de contra deteção. Como o método de modelação do *Raypath* impossibilita a utilização da deteção possível, a contra deteção é a melhor forma de resolver o problema, contudo adiciona erros aos cálculos, visto que assume que o submarino procura a nossa plataforma em modo passivo, sem considerar que o azimute é o recíproco e que o tempo é estacionário.

Fazendo uma última análise generalista desta ferramenta, apresenta como vantagens a possibilidade de interligação com o restantes sensores de bordo, contudo a sua modelação já antiga e simplista de resolver o problema, não é a melhor para uma solução rigorosa dos

dados como se pretende. Finalmente, a configuração e visualização dos menus e resultados não é a melhor, podendo ser definitivamente melhorada.

Uma das principais dificuldades na análise desta ferramenta consiste na falta de elementos que expliquem quais os métodos adotados para resolver os diversos fenómenos acústicos, tornando-se a comparação de resultados pouco rigorosa, contudo no manual do programa é referido que certas questões não são resolvidas, nomeadamente as reverberações, ruído, perfil batimétrico, entre outros, exigindo a sua introdução manual pelo operador, o que limita o seu emprego e rigor.

4.2. FAPSO

Esta ferramenta operacional foi desenvolvida na Escola Naval, pelo CMG Lopes da Costa, no enquadramento da dissertação de mestrado do então ASPOF Vale Marques, no ano letivo 2017/2018, tendo sido melhorada ao longo do presente ano letivo. Teve como objetivo a criação de um programa que pudesse substituir o *Raypath* a bordo dos navios da nossa Marinha. Pretende-se também fazer uma análise tendo em conta os cinco pontos fundamentais mencionados.

Para o traçado de raios sonoros recorre ao *raytracing*, tal como as ferramentas equivalentes mencionadas anteriormente, pelo que considera a propagação dos raios num plano bidimensional, definindo os raios através da distância horizontal ao transdutor e a imersão, contudo, ao contrário do *Raypath*, não considera o oceano plano, representando melhor a realidade encontrada na área de operações.

Tal como o SeaRider e o *Raypath* permite a introdução automática dos perfis de temperatura e/ou velocidade do som, se os mesmos forem retirados das sondas, sobrepondo-se aos valores da climatologia; caso contrário poderá utilizar-se as bases de dados climatológicos, sendo apenas necessário selecionar a que se pretende utilizar. Após isto, são inseridos nos vários submenus existentes para o efeito os diversos parâmetros necessários para determinar os alcances da previsão sonar.

O submenu “Geografia e ambiente”, apresentado na **Figura 66**, engloba os diversos parâmetros necessários para a definição da posição geográfica e das condições meteorológicas e/ou oceanográficas; neste também é selecionada qual a fonte dos perfis de temperatura que se pretende adotar.

Geografia e ambiente

Resolução espacial da climatologia
☐ 0,25 graus ☒ 1 grau

Escolha a posição geográfica de latitude e de longitude

Latitude (14.9 N a 70.0 N):

Longitude (-69.9 W a 0.0 W/E):

Velocidade (nós):

Proa / azimute (0° a 359°):

Tipo de climatologia:

Dados
☒ Só climatologia ☐ Tabela XBT ☐ CTD da EN ☐ BT das fragatas

Ficheiro CTD ou BT:

Escala de Beaufort (SS 0 a 9), vento (nós) e vaga (m):

Precipitação
☐ Ausente ☒ Chuvisco ☐ Moderada ☐ Forte

Densidade de navegação
☐ Ausente ☒ Baixa ☐ Média ☐ Elevada

Natureza do fundo
☐ Lodo ☐ Areia fina ☐ Areia grossa ☒ Areia com rocha ☐ Rocha

Dados XBT:

	z (m)	T (C)
1	0	19.00
2	5	18.90
3	10	18.90
4	15	18.80
5	20	18.80
6	25	18.70
7	30	18.50
8	35	18.00
9	40	17.50
10	45	17.00
11	50	16.00
12	55	15.50
13	60	15.00
14	65	15.00
15	70	14.50
16	75	14.50
17	80	14.00
18	85	14.00
19	90	13.99
20	95	13.98
21	100	13.97
22	125	13.96
23	150	13.95
24	175	13.92
25	200	13.90

Figura 66: Menu “Geografia e ambiente” do FAPSO dedicado à introdução da posição geográfica e das condições meteorológicas e/ou oceanográficas.

O menu “Parâmetros do sonar” permite a introdução das características técnicas dos equipamentos acústicos utilizados e o seu modo de funcionamento, sendo o mesmo apresentado na **Figura 67**.

Parâmetros do sonar

Sonar passivo / ativo
☐ Passivo ☒ Ativo

Freq. de emissão / receção (2-14 kHz):

Largura de banda (0.1-12kHz):

Nível emissão omnidirecional, SL (50 a 230 dB):

Índice de reflexão, TS (-10 a 50 dB):

Índice de diretividade, DI, do recetor (0 a 35 dB):

Índice de diretividade, DI, do projetor (10 a 35dB):

Limiar de deteção, DT (de 10 a 30 dB):

Imersão do transdutor (m): Duração de impulso (s):

Calibração ruído próprio navio (-15 a 15 dB):

Raio superior e inferior em graus (ascen. >0):

Tipo de dispersão geométrica
☐ Separação vertical de raios ☒ Estérico-cilíndrica

Fator (de 1 - cil. a 2 - esf.) para disp. esf.-cilíndrica:

Sugestão para o fator: sonar passivo 1.5 a 1.6; sonar ativo 1.7 a 1.8

Propagação passiva = 46 s ou 69 km Propagação ativa: 20 s ou 30 km

Figura 67: Menu “Parâmetros do sonar” do FAPSO para a introdução das características técnicas dos equipamentos acústicos utilizados e o seu modo de funcionamento.

Da aplicação no programa destes dados resulta o gráfico de traçado dos raios sonoros bidimensional, sendo este bastante semelhante ao obtido no SeaRider. O mesmo é apresentado na **Figura 68**.

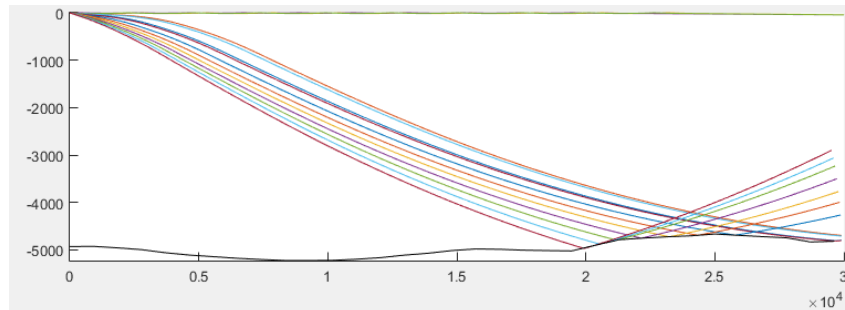


Figura 68: Gráfico de traçado de raios sonoros no FAPSO, sendo este bidimensional visto que apenas considera a distância horizontal ao transdutor e a imersão.

Relativamente aos resultados obtidos da utilização desta ferramenta operacional, existe um menu próprio para a apresentação dos perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som, cujo *layout* é apresentado na **Figura 69**. Para além destes perfis também é apresentado o gráfico da função *raytrace*.

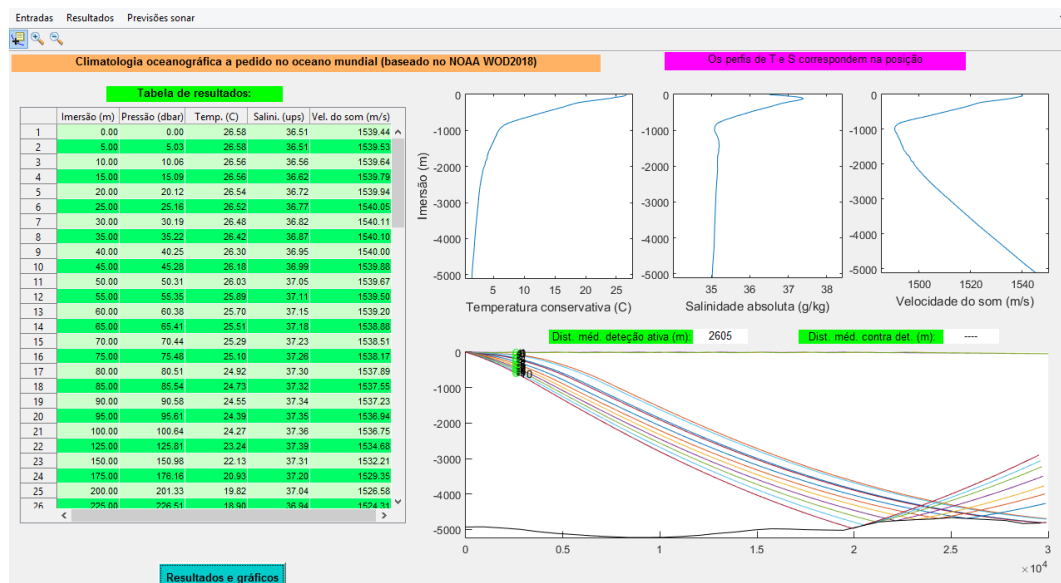


Figura 69: Menu “Resultados” do FAPSO para a apresentação dos perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som e o gráfico da função *raytrace*.

Relativamente ao menu “Previsão sonar”, apresentado na **Figura 70**, permite acesso aos gráficos da função *raytrace*, do excesso de sinal e aos alcances de deteção ou contra deteção.

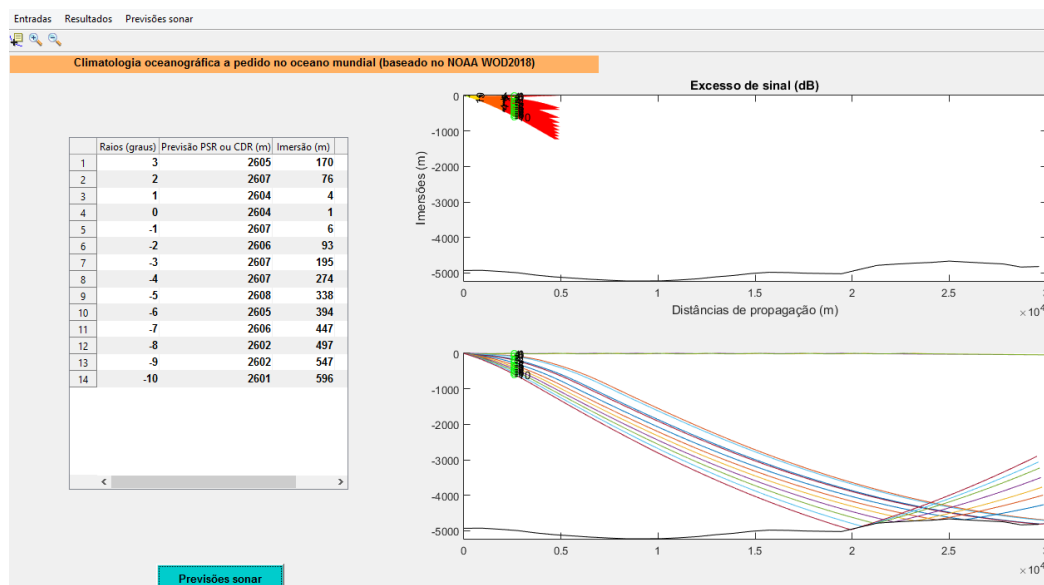


Figura 70: Gráfico de excesso de sinal, sendo o gradiente de cores correspondente a uma diminuição de 15 dB. Este gráfico permite determinar a posição mais provável do submarino.

4.2.2. Análise do FAPSO

Esta ferramenta operacional apenas teve aplicação académica, ainda não tendo sofrido um processo de certificação para ser empregue a bordo dos navios da Marinha, contudo a sua utilização é bastante mais simples que a ferramenta anterior, resolvendo também mais fenómenos acústicos, pelo que deverá produzir resultados mais realistas e rigorosos. Apesar de o seu principal objetivo ser o meio operacional, fornecendo previsões sonares aplicáveis nos diversos exercícios da guerra antissubmarina, este também tem aplicabilidade académica e de apoio ao ensino visto ser independente da ligação aos sensores de bordo.

Será agora feita uma análise do mesmo, tendo em conta os cinco fatores principais mencionados anteriormente. Começando pela introdução dos dados do perfil de temperatura ou velocidade do som, para a utilização dos perfis retirados de sondas XBT é possível inserir os dados automaticamente nas tabelas já existentes para o efeito, ou através dos ficheiros BT ou CTD retirados das sondas, sobrepondo-se à climatologia até à imersão coberta por aqueles sensores, sendo daí para baixo completado pela climatologia.

A introdução dos diversos parâmetros do equipamento acústico utilizado, permite que os mesmos sejam associados aos parâmetros das equações sonar e aumentar o rigor dos cálculos. Os parâmetros relativos ao navio e às condições meteorológicas e

oceanográficas prevalentes, que influenciam os valores do nível de ruído ambiente, bem como o ruído próprio são calculados automaticamente, exigindo menos conhecimentos por parte dos operadores, que nem sempre conhecem a influência dos mesmos na previsão sonar para atribuírem um valor em dB.

Já as perdas por transmissão, o nível de intensidade e as perdas por interação com a superfície e/ou fundo são calculadas automaticamente, partindo apenas dos dados de entrada existentes nos diversos submenus já mencionados anteriormente. Relativamente às características técnicas do sonar, é possível introduzir diretamente o nível de intensidade e o índice de diretividade.

Para o traçado de raios sonoros utiliza o *raytracing*, à semelhança de outras ferramentas operacionais deste género, sendo necessário que o utilizador defina qual a abertura angular dos raios, o seu incremento angular é determinado previamente sendo equivalente a 1°, a profundidade máxima já tem em conta o perfil batimétrico da área de operações, aumentando o rigor dos cálculos.

O cálculo do excesso final é efetuado tendo em conta os diversos parâmetros das equações sonar, partindo dos dados de entrada já mencionados anteriormente. O FAPSO tem capacidade de resolver o excesso de sinal para os sonares a operar em modo ativo e passivo, através da determinação dos alcances de deteção e contra deteção.

Para o modo de operação do sonar passivo, já se verifica uma melhoria relativamente à ferramenta anterior, visto que esse alcance é determinado tendo em conta a equação sonar existente para o efeito, apenas exige que exista inicialmente conhecimento da plataforma submarina que se pretende detetar.

Fazendo uma última análise generalista desta ferramenta, em relação ao SeaRider, apresenta como vantagens a sua utilização mais simples e um desenho que facilita o emprego a bordo dos navios. Para além disso considera já uma maior variedade de fenómenos acústicos.

Em comparação com o SeaRider: 1) apresenta uma arquitetura informática e *interface* (janelas de utilização) bastante distinta; 2) resolve o ruído ambiente através de interpolações (dos valores das tabelas de Sadowski *et al.* (1984), apresentadas em Hodges (2010) pp. 132-133), enquanto o SeaRider interpola pelo método dos mínimos quadrados essas mesmas tabelas; 3) a versão atual do FAPSO tem limites geográficos apenas no Atlântico Norte,

enquanto o SeaRider permite alternativas de áreas geográficas diferentes; 4) não disponibiliza o cálculo do SL através das características técnicas dos equipamentos, o que o SeaRider faz; 5) no cálculo das perdas de transmissão das reverberações o FAPSO utiliza dispersão esférica e o SeaRider esférico-cilíndrica; 6) o FAPSO ao receber reverberações da superfície ou do fundo assume que são uniformes, nos pontos de controlo desde a interação considerada até ao transdutor ou interação anterior (para múltiplas interações), enquanto o SeaRider considera as perdas de transmissão sofridas desde as interações até ao transdutor ou interação anterior (para múltiplas interações).

4.3. Comparação entre as Previsões Sonares do FAPSO, *RAYPATH* e SeaRider

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados dos testes efetuados às três ferramentas operacionais para posições geográficas no Atlântico Norte, no sentido de retirar conclusões sobre os resultados obtidos. Essas posições correspondem a áreas exercícios de guerra antissubmarina realizados pelo NRP “Álvares Cabral”, durante a sua missão Mar Aberto 2019, ou seja, em todas as ferramentas foram introduzidos os mesmos perfis recolhidos a bordo deste navio durante a sua missão.

As posições selecionadas e rumos a que o navio navegava encontram-se na **Tabela 13**, as mesmas são identificadas por letras para não referir sempre a latitude e longitude das mesmas.

<i>Posição</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Rumo da Plataforma</i>	<i>Profundidade</i>
A	25°20'N	015°54'W	215	141
B	15°31'N	023°45'W	196	3.464
C	10°52'N	017°36'W	000	1.693

Tabela 13: Posições geográficas de teste e seus respetivos rumos, para comparação dos resultados da previsão sonar.

Estas três posições geográficas foram inseridas nas três ferramentas operacionais, tendo os resultados sido compilados na tabela da **Tabela 14**, na qual é possível comparar os alcances de deteção e contra deteção.

<i><u>Posição</u></i>	<i><u>Modo de Operação Sonar</u></i>	<i><u>SeaRider</u></i>	<i><u>FAPSO</u></i>	<i><u>Raypath</u></i>
A	Ativo	2.606	(limitado por reverberações)	6.440-22.500
	Passivo	69.608	(limitado por reverberações)	60.000
B	Ativo	6.375	7.782	8.500-12.900
	Passivo	67.151	67.538	37.500
C	Ativo	5.318	N/A	2.500-8.000
	Passivo	67.083	N/A	22.500

Tabela 14: Alcances de deteção e contra deteção, para comparação das três ferramentas operacionais analisadas nesta dissertação de mestrado. Valores em metros.

Estas discrepâncias resultam da forma diferente como os dois modelos tratam as reverberações e as perdas de transmissão, bem como da adoção de formas distintas para calcular o ruído próprio, o ruído ambiente e as interações com a superfície e o fundo. A simplificação resultante de admitir um fundo plano afeta as coordenadas dos pontos de interação com o fundo, o que por sua vez afeta os cálculos das perdas de sinal e reverberações, podendo contribuir para as diferenças ilustradas na Tabela 14.

No caso do FAPSO, a área batimétrica nele atualmente operacionalizada não inclui a posição C (só dispõe de latitudes para norte de 14,9° N), e na posição A, com profundidades relativamente baixas (cerca de 100 a 150 m) está limitado por reverberações da superfície e do fundo. A limitação do FAPSO, devido às reverberações na posição A, deverá estar associada ao traçado de raios acústicos, visto que a determinação das perdas de

transmissão, absorção e reverberações dependem dos pontos de controlo desta função para efectuar os respetivos cálculos.

Uma vez que os pormenores da formulação e do funcionamento do RayPath não são conhecidos e esta ferramenta funciona na prática como uma “caixa negra,” não é possível efectuar uma comparação sistemática entre o RayPath e o SeaRider. O mesmo acontece para o modo de funcionamento passivo.

Assim, é possível concluir que o SeaRider e o FAPSO representam melhor a realidade da área de operações, fornecendo um perfil batimétrico, em detrimento de um oceano plano cuja profundidade máxima é introduzida pelo operador, para além de modelar um maior número de fenómenos acústicos, exigindo menos conhecimentos do operador, que nem sempre consegue representar a realidade do ambiente submarino e apenas utiliza a sua experiência para realizar previsões sonares. Para mais conclusões seria necessário realizar testes, na presença de um submarino e ver qual das ferramentas produz previsões mais próximas dos resultados obtidos nesses testes.

Contudo, das experiências recolhidas pelos operadores a bordo dos navios, o *Raypath* fornece alcances bastante superiores do que aqueles a que os sonares conseguem detetar, quando este está presente. Uma análise rigorosa para comparar as diversas ferramentas exige a realização de testes a bordo das unidades navais, com a presença de submarinos, no sentido de averiguar quais os alcances reais de deteção e sua relação com as diversas previsões sonares. Apesar de testadas a bordo no NRP “Álvares Cabral”, a não aquisição de contato sonar em alguns exercícios limitou os resultados obtidos. Como já referido, outra limitação importante é o não conhecimento do *Raypath*, visto que a resolução dos fenómenos acústicos não é explicada em nenhuma fonte, inclusive no seu manual de utilizador.

Conclusões

A acústica submarina é uma área da física bastante complexa e não existe apenas um modelo ou método para a sua modelação. Assim, a previsão sonar exige inicialmente a modelação da acústica e da propagação de raios acústicos no meio submarino, no qual ocorrem um conjunto de fenómenos que afetam o sinal útil recebido pelos recetores dos equipamentos acústicos utilizados a bordo dos navios.

O desenvolvimento da ferramenta operacional SeaRider exigiu o estudo dos vários modelos existentes atualmente para o cálculo dos diversos parâmetros das equações sonar, e o confronto entre os mesmos no sentido de determinar quais os mais aplicáveis para o objetivo desta dissertação e que produzem resultados mais realistas e rigorosos. A não existência de modelos para alguns desses parâmetros, nomeadamente do ruído próprio e do ruído ambiente, levou à criação de modelos próprios que permitiram resolver questões levantadas pela comunidade operacional ASW.

Tendo em conta o objetivo desta ferramenta, mais concretamente o seu emprego a bordo das unidades navais, procurou-se sempre avaliar e responder às necessidades da comunidade operacional, tendo sido efetuados testes nos navios no sentido de validar os resultados obtidos para o alcance de deteção e contra deteção. A sua comparação com outras ferramentas já existentes salientou a importância de realização de testes com submarinos presentes, para avaliar a fiabilidade dos programas utilizados.

Para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado, foi colocada uma questão central, referida na introdução, da qual surgiram duas questões derivadas. Durante a investigação procurou-se responder às mesmas tendo em conta a metodologia adotada, ou seja, o método da investigação científica.

QD1: Como devem ser modelados os diversos parâmetros das equações sonares?

Perante a complexidade do ambiente submarino, é necessário aceitar um conjunto de pressupostos, para que seja possível resolver a modelação da acústica submarina e obter uma previsão sonar, num período de tempo concordante com as necessidades das unidades navais. Assim, ao longo desta dissertação procurou-se apenas recorrer àqueles que são aceites pela comunidade científica, para diminuir os erros a que estão sujeitas as previsões. Exemplos de pressupostos aceites são as equações sonar (ativa e passiva), que permitem transformar um conjunto de parâmetros relacionados com a plataforma, o equipamento

acústico e condições ambientais em simples subtrações e/ou somas. Outro exemplo é o traçado dos raios acústicos, onde se aceita o *raytracing* como uma teoria válida para representar no plano bidimensional a propagação de raios acústicos.

Deve existir a preocupação de proporcionar aos utilizadores destas ferramentas operacionais a possibilidade de complementar a sua experiência pessoal relativamente a certos fatores mais difíceis de avaliar. Por exemplo, em vez de solicitar ao operador um valor para o ruído ambiente em dB, optar por pedir a inserção do estado do mar, da densidade de navegação e precipitação, sendo os cálculos do ruído gerado por essas condições meteorológicas e oceanográficas realizados automaticamente pelo *software*.

Esta abordagem permite minimizar os erros que afetam o cálculo dos alcances de deteção e contra deteção, visto que nem sempre o operador é conhecedor da influência que os diversos fatores tidos em conta têm nos diferentes parâmetros. Para além disso facilita a utilização.

QD2: Qual a base de dados a utilizar para obter os perfis de temperatura e salinidade? E para a obtenção do perfil batimétrico do fundo do mar?

A base de dados mais completa e compatível com a linguagem de programação MATLAB é a base de dados WOD2018 da NOAA para a obtenção dos perfis de temperatura e salinidade. Relativamente ao perfil batimétrico adotou-se a base da GEBCO, pela sua compatibilidade com o MATLAB e pela possibilidade de escolher a área geográfica da qual se pretende as profundidades.

QC: Como obter uma previsão sonar a partir das equações sonar, conhecendo as características técnicas do equipamento acústico, através da construção de uma ferramenta computacional, em linguagem MATLAB, que corresponda às necessidades da comunidade operacional?

Para responder à questão central, foi necessário encontrar respostas para as duas questões derivadas mencionadas anteriormente.

Sendo o objetivo desta dissertação o desenvolvimento de uma ferramenta operacional, que seja empregue nas unidades navais, foi necessário junto da comunidade operacional perceber quais as fragilidades e aspetos positivos apontados aos programas já existentes para o efeito. São exemplos, a necessidade de ler ficheiros BT em detrimento de uma introdução manual dos perfis de temperatura, uma introdução simples dos dados organizados em equipamento acústico, geografia, bases de dados, meio, alvo e plataforma

própria, ou até a existência de valores *default* que orientem o operador em termos de valores aceitáveis para os parâmetros das equações.

Com os diversos parâmetros introduzidos pelo operador, que se procurou basear em dados facilmente medidos/identificáveis pelo mesmo, a ferramenta operacional determina automaticamente os diversos parâmetros das equações sonar e resolve as mesmas em função do excesso de sinal, com uma probabilidade de deteção de 50%. Finalmente apresenta o gráfico de excesso de sinal e os alcances de deteção e contra deteção.

Não foi possível determinar, de forma sistemática, qual das três ferramentas estudadas responde melhor às necessidades da comunidade operacional. Tal ficou a dever-se a duas razões fundamentais. Em primeiro lugar, não são conhecidos os pormenores relativos à formulação e funcionamento do RayPath, que funciona como “caixa negra”. Em segundo lugar, seria necessário realizar mais testes em exercícios reais com a presença de submarinos.”

Assim, o SeaRider apresenta as seguintes vantagens: recorre à climatologia para a obtenção dos perfis de temperatura e salinidade, à escala mundial, nas resoluções de 1 e de 0,25 graus de latitude e de longitude, da *World Ocean Database 2018* (fonte aberta) da NOAA, incluindo as climatologias de médias anuais, mensais e estações do ano; calcula o perfil batimétrico através da batimetria GEBCO do oceano, na resolução espacial de 0,5 milhas; usa uma abordagem coerente e automática para o cálculo do ruído ambiente e próprio e permite a entrada de dados de XBT, BT, CTD e SVP.

Referências Bibliográficas

- AINSLIE, M., MCCOLM, J., (1998), "A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol 103(3), 1671-1672.
- COLLIER, R. (1998), "Ship and Platform noise, Propeller noise", *Handbook of Acoustics*, editado por Malcolm J. Crocker, John Wiley & Sons, Inc., Canadá, 1998, pp. 407-424.
- COSTA, C., (2017), Apontamentos sobre acústica submarina e equações do sonar, Escola Naval, Alfeite.
- ETTER, P., (2013), *Underwater acoustic modeling and simulation*, Taylor & Francis Inc, ed.4.
- FERNANDES, J.A.B. (1967), *Manual de Hidrografia*, Instituto Hidrográfico, Lisboa, 1967.
- FISHER, F., SIMMONS, V., (1977), "Sound Absorption in Sea Water", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 62:558.
- HARLAND, E. J., JONES, S.A.S., CLARKE, T., (2005)., "SEA 6 Technical report: underwater ambient noise Farnborough", UK. Qinetiq 48 pp.
- HODGES, R., (2010), *Underwater acoustics. Analysis, design and performance sonar*, John Willey and Sons Ltd., Inglaterra, ed.1.
- HOVEM, J., (2013), "Ray Trace Modeling of Underwater Sound Propagation", *Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices*, editado por Marco G. Beghi, InTech, DOI: 10.5772/55935, <https://www.intechopen.com/books/modeling-and-measurement-methods-for-acoustic-waves-and-for-acoustic-microdevices/ray-trace-modeling-of-underwater-sound-propagation>, acedido em Março de 2018.
- KINSLER, L.E. *et al.*, (1982), *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, ed.3.
- LENK, P., (1996), *RAYPATH Instruction Manual*, Department of National Defence of Canada.
- LENK, P., (1996), *Raypath plotting programme operation manual*, version 3.0, Department of National Defence of Canada.

- NAVE, R., (n.d.), *Sound intensity*, Retirado de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/intens.html> em 28/11/2017.
- PAWLOWICZ, R., (2013), *What every oceanographer needs to know about TEOS-10 (The TEOS-10 Primer)*, http://www.teos-10.org/pubs/TEOS-10_Primer.pdf, acedido em Novembro de 2017.
- RICHARDSON, W. *et al.*, (2013), *Marine mammals and noise*, Academic Press, ed. 1.
- S. JAFRI E A. PERVEZ, *Noise effects on Surface Ship Passive Sonar and possible ASW solution*, p. 31.
- TORRES, C., e COSTA, C., (2019), *Underwater Ambient Noise – Na Estimation Methodology*, Inter-Noise 2019, Madrid.
- TUCHOLSKI, E., (2006), *Underwater Acoustics and Sonar SP411 Handouts and Notes*, Physics Department, pp. 169-179, USNA.
- URICK, R., (1983), *Principles of underwater sound*, United States of America: McGraw-Hill, Inc., ed.3.
- VARELA, A., (2001), *Apontamentos de armas submarinas e sistemas de deteção e armamento submarino*, Escola Naval, Alfeite.
- WAITE, A., (2002), *Sonar for Practicing Engineers*, John Willey and Sons Ltd., Inglaterra, ed.3.

Apêndice A – Resumo alargado

1. Introdução

A propagação das ondas sonoras no ambiente submarino está sujeita a um conjunto de fenómenos acústicos, que degradam o sinal útil emitido pelos transdutores. São exemplos desses fenómenos as reverberações (estas têm geralmente a sua origem na presença de bolhas ou seres vivos), reflexões na superfície e/ou fundo e as perdas por propagação.

A modelação da acústica submarina, e consequentemente de todos os fenómenos acústicos que ocorrem, é um processo bastante complexo, não existindo apenas um modelo ou método para a resolver. O SeaRider parte de um conjunto de pressupostos considerados válidos pela comunidade científica, tais como as equações sonar e a função *raytrace*, para obter previsões de alcances de deteção e contra deteção, tendo em conta as condições oceanográficas e/ou meteorológicos, as características da plataforma própria, do alvo e do equipamento acústico utilizado.

2. SeaRider e Pressupostos Empíricos Aceites

Para responder às necessidades da comunidade operacional, houve a necessidade de aceitar um conjunto de pressupostos empíricos, que permitam o cálculo das previsões rapidamente, sem que tal implique perda de rigor ou existência de erros nos cálculos efetuados. As restantes ferramentas operacionais existentes na atualidade também recorrem a estes pressupostos, nomeadamente o FAPSO e o *Raypath*, sendo o último utilizado a bordo das unidades navais da Marinha e o FAPSO um programa desenvolvido na Escola Naval, que visa uma utilização académica, mas também operacional.

O SeaRider parte de dois pressupostos principais, o primeiro sendo as equações sonar, que transformam um conjunto de parâmetros relacionados com as condições METOC (Meteorológicas e Oceanográficas), características técnicas dos equipamentos acústicos, da plataforma própria e do alvo, assim como o conjunto de fenómenos acústicos que ocorrem no ambiente submarino; de salientar as reverberações e perdas por propagação em simples somas e subtração. O segundo é o *raytracing*, utilizado para o traçado de raios sonoros, que permite conhecer as coordenadas horizontais e verticais de interação com o fundo e/ou superfície.

2.1. Equações sonar

Tendo como objetivo a previsão sonar, estas equações relacionam um conjunto de parâmetros que representam os diversos fenómenos a que é sujeito o sinal sonoro, desde que é emitido até ser detetado pelo sistema acústico que processa o sinal. Aquelas equações tornam-se relevantes pela relação logarítmica estabelecida entre esses parâmetros, sendo os cálculos reduzidos a simples adições e subtrações.

Contudo, as equações sonar são apenas uma representação aproximada da realidade do ambiente submarino, visto que o oceano apresenta uma variabilidade temporal e geográfica bastante elevada, devido aos processos físicos e químicos que ocorrem no seu seio não terem sempre a mesma expressão. Para se obter um determinado nível de desempenho, existe uma relação sinal-ruído mínima estabelecida, sendo que o excesso de sinal corresponde ao valor que se tem em relação a essa condição.

No caso da deteção, esse valor mínimo designa-se por limiar de deteção (DT, sigla em inglês para *detection threshold*), que corresponde à relação sinal-ruído requerida para uma probabilidade de deteção de 50%, num determinado período de propagação, sendo conhecida a possibilidade de ocorrerem falsos alarmes. Para que exista excesso de sinal é necessário que sejam cumpridas as seguintes condições.

$$SL - 2TL + TS - NL + DI - DT - RL > 0 \quad (\text{se sonar ativo})$$

$$SL - TL - NL + DI - DT > 0 \quad (\text{se sonar passivo})$$

Os ditos termos das equações dependem do sistema acústico, do meio de propagação e do alvo que se pretende detetar, sendo as unidades dos níveis sonoros o dB, relativos a uma onda plana de referência cuja intensidade corresponde a 1 μPa (Urick, 1983, p. 19). Assim, depende do sonar: o nível sonoro do projetor (SL), o nível de ruído próprio (SN), o índice de diretividade (DI) e o limiar de deteção (DT); do meio depende: as perdas de transmissão (TL), o nível de reverberação (RL), o ruído total (NL) - que inclui o ruído próprio (SN) - e o ruído ambiente (ANL); finalmente do alvo, a refletividade do alvo (TS) e o nível sonoro (SL), sendo que este apenas se aplica para o sonar passivo. As siglas indicadas correspondem ao usual no jargão em inglês.

2.2. Raytracing

Para a modelação da acústica submarina é necessário a aplicação de uma teoria de traçado dos raios sonoros, sendo nesta ferramenta utilizada a *raytracing*. Não se encontrando

outras versões livres disponíveis para utilização, foi adotado o algoritmo, escrito em linguagem MATLAB, de Val Schmidt (embora não publicado em artigo referenciado, é datado de 2009), da Universidade de New Brunswick.

Esta função permite calcular o percurso de um raio desde que este é emitido pela fonte sonora, proporcionando as coordenadas verticais e horizontais, em pontos de controlo ao longo do percurso, o que permitirá os cálculos das perdas devido aos fenómenos de dispersão e absorção do som, assim como a distância percorrida pelos mesmos raios. Este algoritmo considera que a velocidade do som será a mesma ao longo dessa profundidade, ou seja, considera apenas gradientes verticais da velocidade do som, assumindo iguais valores na horizontal. Apesar de tal não representar perfeitamente a realidade, é uma aproximação necessária e bastante consistente e usual para a modelação da acústica submarina, nos alcances de aplicação da ferramenta (distâncias de alguns até poucas dezenas de quilómetros).

2.3. *Nível de reverberação*

O estudo das reverberações exige a sua divisão em três componentes distintas, de referir a reverberação de volume, de superfície e de fundo, sendo que cada uma destas exige um processo diferente para a sua resolução.

A reverberação de volume existe devido à presença, na água do mar, de seres vivos ou dispersores, que geram reflexões aleatórias indesejadas que são posteriormente detetadas pelos receptores dos equipamentos acústicos, dificultando a deteção do sinal útil pretendido, ou seja, do alvo. Para ser possível o cálculo é necessário determinar os valores de *backscattering* que, a nível académico em Portugal, é referido como espalhamento de retorno, que é característico de cada profundidade da coluna de água que se pretende estudar, dependendo ainda do tempo de propagação considerado e da frequência do sonar em questão, além da área geográfica oceânica em questão. Este parâmetro caracteriza-se por uma elevada variabilidade temporal e espacial, devendo-se, sempre que possível, caracterizar a área de operação com a informação oceanográfica disponível, assim como a vida marinha que nela habita.

3. SeaRider – Resultados Obtidos

Sendo o objetivo principal da ferramenta operacional SeaRider a sua utilização a bordo das unidades navais, procurou-se responder às necessidades da comunidade operacional, desenvolvendo-se um programa simples e de fácil utilização.

Para os perfis de temperatura e salinidade utilizou-se a base de dados da NOAA, designada de WOD18, sendo compatível com a linguagem de programação *MATLAB*. Relativamente ao fundo do mar, partindo da posição geográfica do navio e o rumo a que este navega, e recorrendo às fórmulas de transporte de coordenadas geodésicas determinou-se o perfil batimétrico, importante para a determinação das coordenadas verticais e horizontais das interações com o fundo mar e com a superfície.

Para a seleção das fontes dos perfis, o SeaRider permite ao operador selecionar se pretende usar a climatologia, as tabelas para introdução de dados XSV (*eXpendable Sound Velocimeter*) ou XBT (*eXpendable Bathy Thermograph*), ficheiros de dados BT ou do CTD (*Conductivity Temperature and Depth Sensor*). Devendo preferencialmente utilizar-se os dados das sondas, visto que representam melhor a realidade da área de operações no momento em que se realiza a previsão sonar. Na **Fig.1.** encontra-se a janela existente para a escolha dos dados que se pretende utilizar.

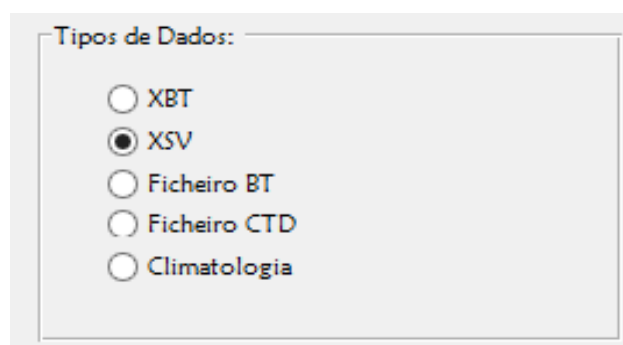


Fig.1. Janela de escolha do tipo de dados que se pretende utilizar para a obtenção dos perfis de temperatura e salinidade.

No separador “Perfis”, o operador poderá observar os perfis de temperatura, salinidade e velocidade som, como exemplo na **Fig.2.** foram calculados os perfis utilizando as bases de dados climatológicas da WOD18 anual, com a resolução de 1° na posição geográfica 36,9° N e 39,9° W.

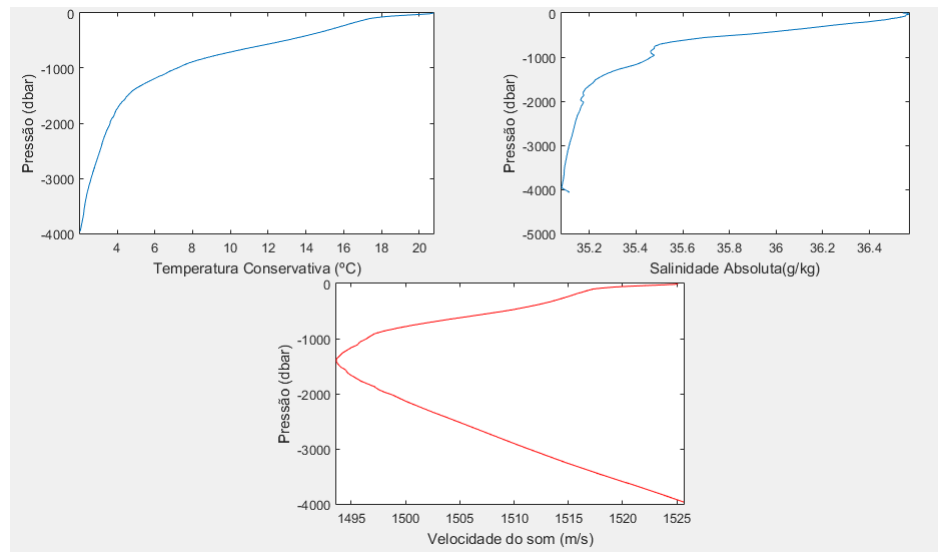


Fig.2. Perfis obtidos das bases de dados climatológicas da WOD18 anual, com a resolução de 1° na posição geográfica $36,9^\circ$ N e $39,9^\circ$ W.

O perfil de velocidade do som resultante, obtido através dos perfis de temperatura e salinidade, é utilizado para o cálculo do traçado de raios sonoros recorrendo à função *raytrace*. Na **Fig.3.** é apresentado o gráfico de traçado para a posição geográfica anterior.

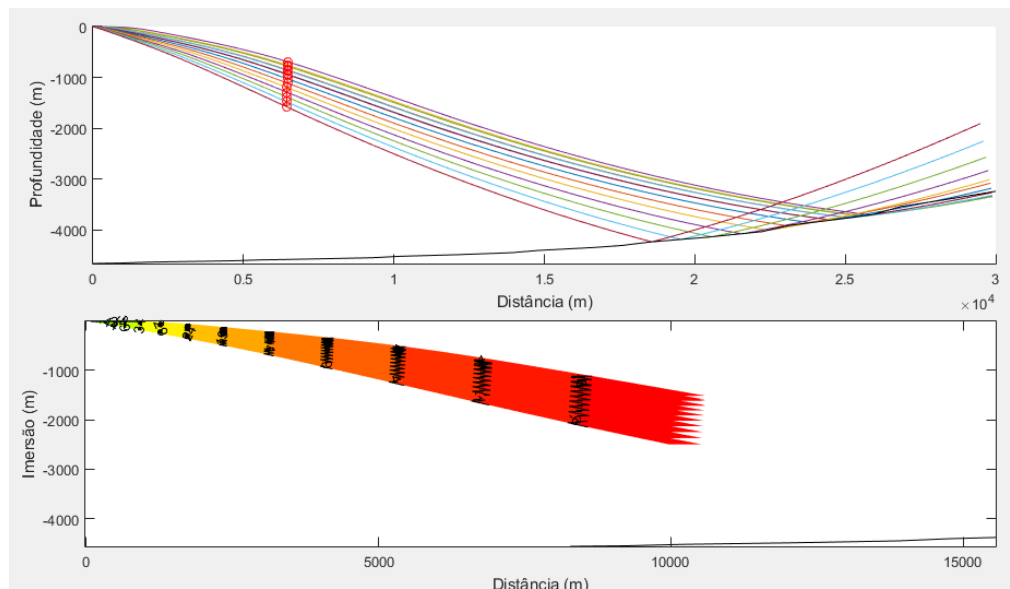


Fig. 3. Determinação dos trajetos percorridos por raios sonoros, utilizando o algoritmo de Val Schmidt.

Através dos pontos de controlo da função anterior, calcula-se as distâncias horizontais e totais de cada raio, importantes para a determinação das perdas por absorção e dispersão geométrica, que contribuem para a determinação das perdas de transmissão, parâmetro de entrada nas equações sonares.

A absorção depende de um conjunto de características do meio onde ocorre a propagação acústica, nomeadamente a temperatura, a salinidade, o pH (que é tido, por defeito, como 8,2, valor médio ou típico do oceano, sendo possível introduzir o pH específico da área de operações) e da profundidade; depende ainda do equipamento acústico, mais concretamente da sua frequência de operação. Para resolver este problema foram utilizados os perfis da WOD18, que fornecem a temperatura e a salinidade para praticamente todas as áreas navegáveis, sendo determinado o valor médio destes parâmetros para ser possível o cálculo do coeficiente de absorção. Valores normais para este parâmetro rondam os 0,6 dB/km.

Relativamente às perdas por dispersão geométrica, foram utilizados dois métodos distintos, a dispersão esférico-cilíndrica e a separação vertical de raios.

Estas perdas de transmissão, entre a fonte e qualquer ponto do diagrama de raios (como já referido anteriormente os cálculos são efetuados para os pontos de controlo da função *raytrace* adotada), podem ser determinados através da separação vertical entre raios que são projetados a incrementos verticais de um grau na fonte, e que relativamente ao alvo ou pontos de controlo em estudo se irão propagar, ao longo da distância, a intervalos verticais variáveis.

O outro método possível de ser seleccionado pelo operador é a dispersão esférico-cilíndrica, no qual o utilizador poderá introduzir um fator designado de *beta*, o qual indica se a dispersão se aproxima mais da esférica ($\beta = 2$) ou da cilíndrica ($\beta = 1$).

O estudo das reverberações exige a sua divisão em três componentes distintas, de referir a reverberação de volume, de superfície e de fundo, sendo que cada uma destas exige um processo diferente para a sua resolução.

A reverberação de volume existe devido à presença na água do mar de seres vivos ou dispersores, que geram reflexões aleatórias indesejadas que são posteriormente detetadas pelos receptores dos equipamentos acústicos, dificultando a deteção do sinal útil pretendido, ou seja, do alvo. Para ser possível o cálculo é necessário determinar os valores de *backscattering* que é característico de cada profundidade da coluna de água que se pretende estudar, dependendo ainda do tempo de propagação considerado e da frequência do sonar em questão, além da área geográfica oceânica em questão.

O processo para a determinação da reverberação de fundo e de superfície é bastante mais complexo, visto que depende de um conjunto bastante diversificado de fatores. Contudo, depende sempre do nível de intensidade de emissão do sistema acústico do navio, da capacidade refletora da superfície ou do fundo do mar (TS_{rev}) e das perdas de transmissão sofridas pelo sinal sonoro até ao espalhador e também, após a sua reflexão, até ao receptor, ou seja, $2TL_{rev}$, resultando que $RL = SL + TS_{rev} - 2TL_{rev}$ (Hodges, 2010, p. 154), em que $TS_{rev} = BS_{rev} + 10\log(A \text{ ou } V)$.

É feita uma comparação entre o nível de reverberação e o nível de ruído (NL), sendo este a soma nível de ruído ambiental (ANL) e de ruído próprio. Como a deteção sofre sempre de um destes fatores de modo mais evidente, apenas é utilizado nas equações sonares o predominante. O ruído ambiente é calculado através do estado do mar, densidade de navegação e precipitação inseridos pelo operador, através de funções calculadas pelo método dos mínimos quadrados. O ruído próprio parte da velocidade da plataforma própria e de um coeficiente de calibração, relativamente a um “*destroyer* moderno” estudado por Urick, em 1983.

No final são resolvidas as equações sonar, em função do excesso de sinal, sendo apresentado o gráfico correspondente, assim como os valores do alcance de deteção e contra deteção. Na **Fig. 4**. É apresentado o gráfico de excesso de sinal.

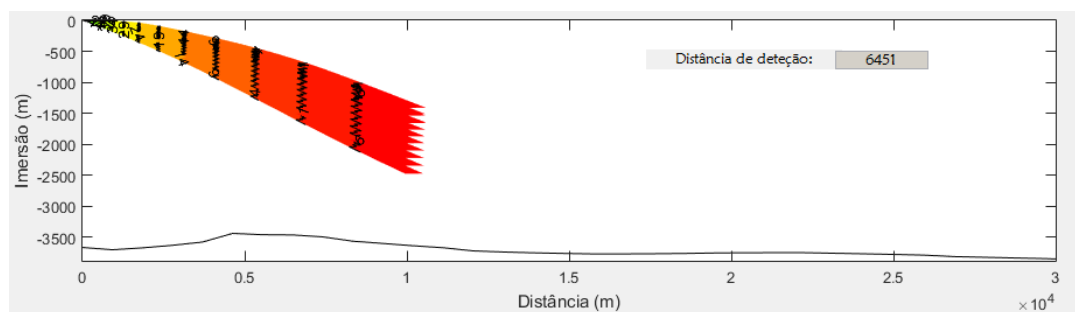


Fig. 4. Gráfico de excesso de sinal e respectivos alcances sonares resultantes aplicação da base de dados anual, com 1° de resolução espacial, para a posição latitude 36,9° N, longitude 39,9° W, para um azimuth de 090° e distância de 50 milhas, com o sonar a operar em modo ativo.

4. Conclusão

A acústica submarina é uma área da física bastante complexa e não existe apenas um modelo ou método para a sua modelação. Assim, a previsão sonar exige inicialmente a modelação da acústica e da propagação de raios sonoros no meio submarino, no qual

ocorrem um conjunto de fenómenos que afetam o sinal útil recebido pelos receptores dos equipamentos acústicos utilizados a bordo dos navios, neste sentido são fundamentais certos pressupostos empíricos, nomeadamente as equações sonar e a teoria de traçado de raios sonoros.

O desenvolvimento da ferramenta operacional SeaRider exigiu o estudo dos vários modelos existentes atualmente para o cálculo dos diversos parâmetros das equações sonar, e o confronto entre os mesmos no sentido de determinar quais os mais aplicáveis para o objetivo desta dissertação e que produzem resultados mais realistas e rigorosos. Assim, através da introdução de dados baseados nas condições meteorológicas e/ou oceanográficas, características técnicas do equipamento acústico, do alvo e da plataforma própria, o SeaRider resolve as equações sonar e determina os alcances de deteção e contra deteção.

Entre as mais valias podem referir-se a utilização de climatologia global, de uso da batimetria GEBCO global (resolução de 0,5 milhas), cálculos automatizados para ruídos ambiente e próprios, bem como para reverberações, permite a entrada de dados de XBT, XSV, BT ou CTD (sobrepondo-se à climatologia) e é fonte aberta permitindo a sua atualização.

Apêndice B – Manual de Utilizador do SeaRider

1. Objetivo

O SeaRider é uma ferramenta operacional, na área da acústica submarina, que resolve a modelação da acústica submarina, fornecendo previsões sonares. Baseia-se na resolução das equações sonares em função do excesso de sinal, ou seja, os alcances de deteção e contra deteção obtidos garantem uma probabilidade de deteção de, pelo menos, 50%. Esta informação é imprescindível para planeamento e execução de exercícios e operações ASW (*Anti-Submarine Warfare*), no sentido de otimizar o desempenho dos sensores de bordo.

Com base na posição geográfica do navio e rumo a que navega (ou azimuth desejado), as condições meteorológicas e/ou oceanográficas, características técnicas do equipamento acústico, plataforma própria e do alvo que se pretende detectar, são apresentados os perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som, o perfil batimétrico, o gráfico do traçado de raios sonoros e o gráfico de excesso de sinal.

2. Requisitos para Instalação do SeaRider

Para instalar e utilizar esta ferramenta operacional é necessário o seguinte:

- Sistema operativo do computador de 64 bits;
- Pelo menos 2 Gb de espaço livre no disco rígido.

3. Instruções para Instalar o Programa

Para instalar este programa é necessário seguir os seguintes passos:

- Caso não esteja instalado no computador em que pretende utilizar o SeaRider o *Matlab Compiler Runtime*, instalar o ficheiro “MCRInstaller.exe” disponibilizado na pasta do *software*;
- Copiar a pasta “SeaRider” para uma pasta do computador.

4. Como Iniciar a Utilização do SeaRider

Após instalação do *Matlab Compiler Runtime*, apenas é necessário o seguinte:

- Abrir a pasta “SeaRider”;
- Duplo clique em “SeaRider_AtlanticoNorte.exe”.

5. Organização dos Menus

O SeaRider está organizado por menus, facilitando ao utilizador/operador da ferramenta alterar os parâmetros pretendidos relativamente aos valores *defaults* que já se encontram inseridos. Na barra superior do programa encontram-se os parâmetros relativos à base de dados, área de operações, meio, alvo, plataforma própria, tipo de propagação, largura de banda e acesso ao manual de utilizador, tal como apresentado na **Fig. 1.** deste manual de utilizador.

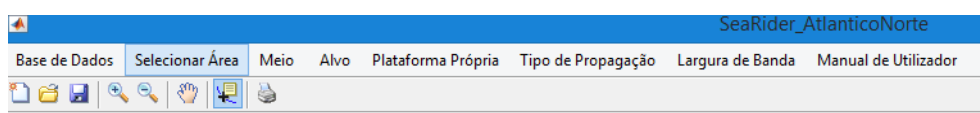


Fig. 1. Menus da barra superior do SeaRider.

O menu “Base de Dados” permite selecionar qual a base da NOAA que se pretende utilizar, estando disponíveis as versões anual, sazonais e mensais. Paralelamente, são fornecidas duas resoluções, a de 1° e a de $\frac{1}{4}^\circ$, ou seja, a grelha espacial tem áreas elementares de um grau quadrado ou de dezasseis avos de grau quadrados. A área de operações permite definir qual o oceano que se pretende utilizar estando prédefinido o Atlântico Norte, por ser a área mais usual de se realizarem operações navais pela Marinha Portuguesa.

O menu “Meio” possibilita ao operador selecionar o tipo de fundo e as condições meteorológicas e/ou oceanográficas presentes no momento da previsão. O “Tipo de Propagação” serve para definir o tipo de dispersão geométrica, sendo disponibilizadas dois modelos distintos, nomeadamente a separação vertical de raios e a dispersão esférico-cilíndrica. Para os menus “Alvo” e “Plataforma Própria” são introduzidas as velocidades e tipo de propulsão, sendo que no alvo deve-se ainda inserir qual o índice de refletividade do mesmo.

Existem ainda duas janelas no lado direito do programa, servem para a introdução da posição geográfica e rumo do navio (ou azimute pretendido), que através da base de dados batimétrica da GEBCO, e resolvendo o transporte de coordenadas geodésicas calcula o perfil batimétrico do fundo do mar, importante para a determinação das coordenadas verticais e horizontais de interação com o fundo do mar, na **Fig. 2.** são apresentadas estas janelas. A outra janela é para a entrada das características técnicas do sonar de bordo.

Posição Geográfica	
Latitude	35
Longitude	-9
Azimute	270
Distância	50

Informações Sonar	
Raio Inferior	-10
Raio Superior	3
Imersão transdutor	1
Frequência de Transmissão (kHz)	7
Frequência de Recepção (kHz)	7
SL	Introduzir val...
DI de transmissão	10
DI de Recepção	10
DT	21
Sonar	Ativo

Fig. 2. Janelas para introdução da posição geográfica do navio e rumo a que navega e das características técnicas do equipamento acústico utilizado.

6. Separadores para Apresentação dos Resultados

Existem cinco separadores distintos para apresentação dos resultados, sendo de referir:

- Separador “XBT” - de salientar que na ferramenta o utilizador poderá seleccionar se pretende utilizar as bases de dados climatológicas ou os dados das sondas XBT (sigla em inglês para *eXpendable BathyThermograph profiler*) e XSV (sigla em inglês para *eXpendable Sound Velocity profiler*), cuja falta de dados é suprimida recorrendo à climatologia, visto que abaixo da camada de mistura⁹⁷ e da termoclina sazonal as variações da temperatura e salinidade não são significativas, sendo assim uma aproximação aceitável, visto que não introduz erros aos cálculos efetuados. Para efeitos académicos também poderão ser utilizados os ficheiros recolhidos do CTD (*Conductivity Temperature and Depth Sensor*). Na **Fig. 3.** é apresentado este separador.

⁹⁷ Define-se por camada de mistura a camada superficial na qual ocorre homogeneização da temperatura e salinidade por ação do vento e das vagas, cuja espessura varia ao longo do ano. A espessura é máxima no inverno, período durante o qual pode atingir os 100 ou mais metros devido à maior agitação marítima e às menores temperaturas superficiais, e mínima no verão.

Perfis T, S e c

Tipos de Dados:

- ☐ XBT
- ☒ XSV
- ☐ Ficheiro BT
- ☐ Ficheiro CTD
- ☐ Climatologia

Nome do Ficheiro

025655_2018-10-20_08-43-42_proc.csv

Profundidade	Temperatura
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8	35
9	40
10	45
11	50
12	55
13	60
14	65
15	70
16	75
17	80
18	85
19	90
20	95
21	100
22	125
23	150
24	175
25	200
26	225
27	250

Profundidade	Velocidade do Som
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8	35
9	40
10	45
11	50
12	55
13	60
14	65
15	70
16	75
17	80
18	85
19	90
20	95
21	100
22	125
23	150
24	175
25	200
26	225
27	250

Fig. 3. Separador para escolha do tipo de dados que se pretende utilizar para cálculo dos perfis de temperatura, salinidade e profundidade do som.

- Relativamente ao separador “Perfis” calcula os perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som, tendo em conta o tipo de dados selecionado. Se não for utilizada a climatologia, será calculada a profundidade máxima dos dados fornecidos sendo, a partir dessa profundidade, os perfis sobrepostos pelas bases de dados climatológicos, na **Fig. 4.** está representado neste separador.

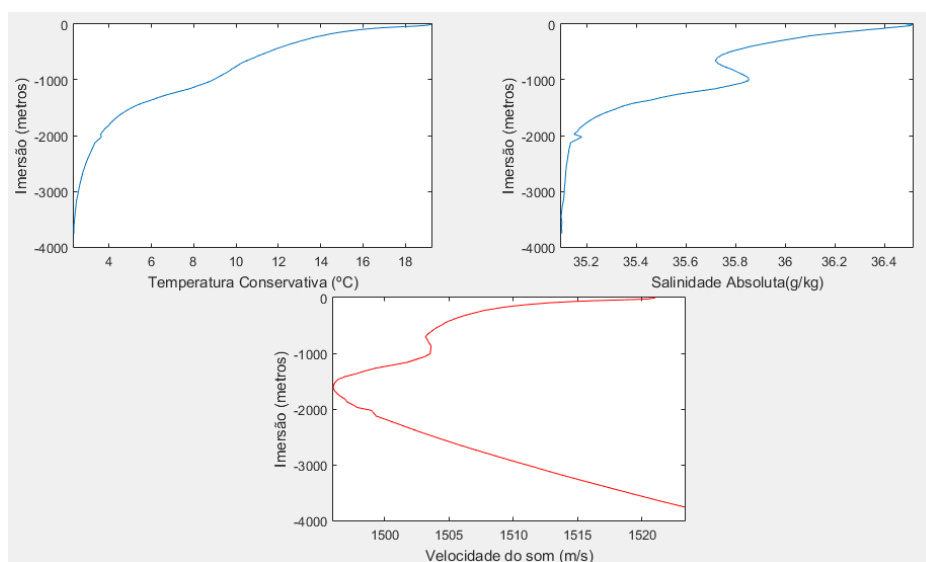
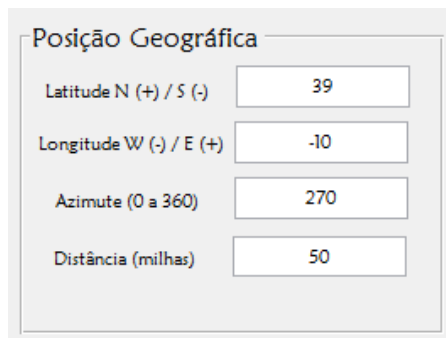


Fig. 4. Separador para o cálculo dos perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som para a coluna de água.

- Para a utilização da função *raytracing* é necessário conhecer o perfil batimétrico da área de operações, sobretudo no azimuth correspondente ao rumo a que o navio navega (ou azimuth pretendido para a energia projetada), para que a determinação das coordenadas

horizontais e verticais do trajeto percorrido pelos diversos raios sejam calculadas com precisão. É destas coordenadas que depende os cálculos de reverberação e perdas de fundo ou superfície, que influenciam a previsão sonar.

No separador “Perfil Batimétrico”, é resolvido o transporte de coordenadas geodésicas através dos cálculos de geodesia no elipsóide, tendo como dados de entrada a posição geográfica (latitude e longitude), azimute e distância, tal como apresentado na **Fig. 5**, onde são apresentados os dados de entrada para o seu cálculo.



Posição Geográfica

Latitude N (+) / S (-)	39
Longitude W (-) / E (+)	-10
Azimute (0 a 360)	270
Distância (milhas)	50

Fig.5. Dados de entrada para a determinação do perfil batimétrico.

Por uma questão de convenção, na introdução dos dados o operador deve introduzir as latitudes e longitudes com os sinais indicados (positivas para N e E, e negativas para S e W). Da aplicação destas para a posição, distância e azimute na **Fig.5.**, resulta o perfil batimétrico da **Fig. 6**.

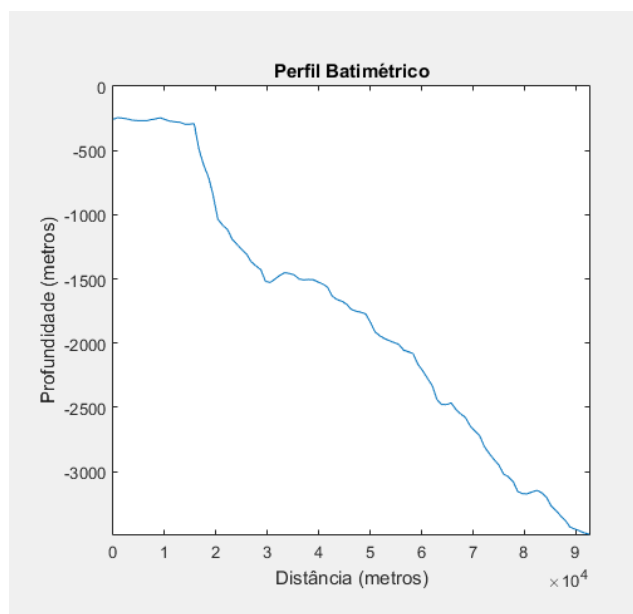


Fig. 6. Perfil batimétrico obtido através da aplicação dos cálculos de geodesia no elipsoide do Manual de Hidrografia (J.A.B. Fernandes, 1967).

- O separador “Batimetria” faz a representação de um mapa batimétrico tendo em conta a área de operações selecionada pelo operador/utilizador desta ferramenta. Na **Fig. 7.** está representado o mapa batimétrico obtido no SeaRider, com recurso às bases de dados da GEBCO.

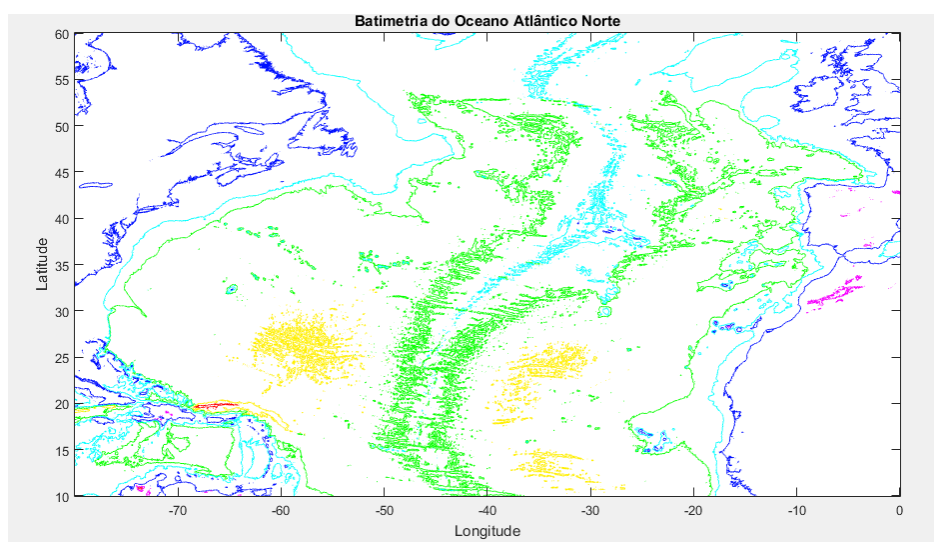


Fig. 7. Mapa batimétrico do Atlântico Norte, obtido com recurso às bases de dados da GEBCO.

- No separador “Previsão Sonar” é resolvido o traçado de raios sonoros, tendo em conta os dados introduzidos pelo operador e as equações sonar, em função do excesso de sinal, de

modo a garantir uma probabilidade de detecção de, pelo menos, 50%. Na **Fig. 8.** são apresentados estes dois gráficos.

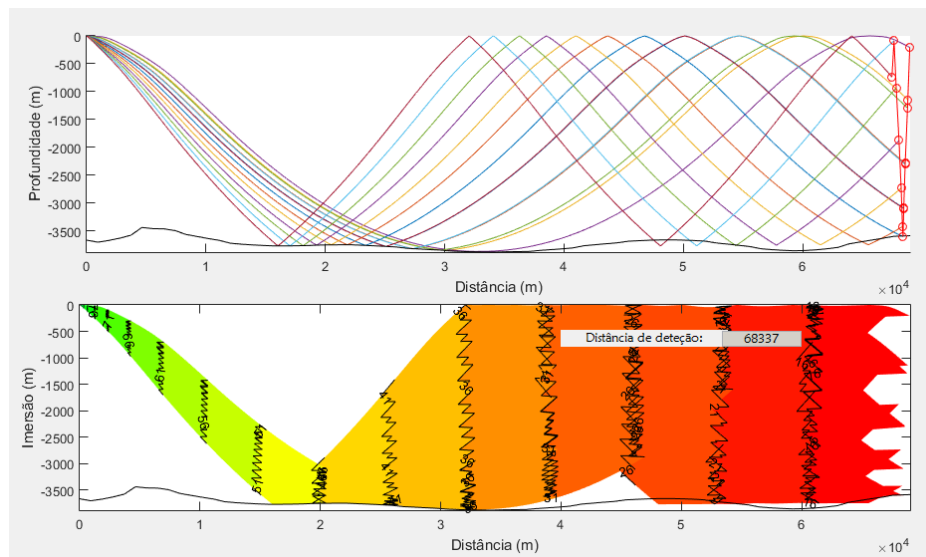


Fig. 8. Gráficos de traçado de raios sonoros e de excesso de sinal (a variação de cor implica uma diminuição de 5 dB).

7. Correr o SeaRider Passo a Passo

1. Introduzir a posição geográfica - deve-se ter o cuidado de utilizar o sinal negativo para latitudes sul e longitudes oeste;
2. Selecionar a base de dados que pretende utilizar para a climatologia, a área de operações pretendida, o método de cálculo das perdas de transmissão as características técnicas do equipamento acústico, da plataforma própria e do alvo;
3. Selecionar o tipo de dados se pretende utilizar para o cálculo dos perfis de temperatura, salinidade e profundidade do som.
4. Pressionar o separador “Perfis” para visualização dos perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som;
5. Pressionar o separador “Perfil Batimétrico” para visualizar o mesmo, tendo em conta a posição geográfica do navio e rumo a que navega;
6. Pressionar o separador “Batimetria” para visualizar o mapa batimétrico da área de operações;

7. Pressionar o separador “Previsão Sonar” para visualizar os gráficos de traçado de raios sonoros e excesso de sinal.

8. Ferramentas Auxiliares

O SeaRider apresenta um conjunto de ferramentas auxiliares, que podem ser úteis ao utilizador, no sentido de melhorar a observação dos gráficos e/ou resultados, ou até para guardar os resultados obtidos.

Na barra superior aos menus existentes para a introdução dos dados pelo operador, estão disponíveis as ditas ferramentas auxiliares, nomeadamente as operações de ampliar ou diminuir os gráficos, mover os mesmos ou leitura das coordenadas verticais e horizontais.

Apêndice C – Resultados obtidos durante o CTPH19

Durante o exercício multinacional Contex/Phibex 2019, realizado entre 19 de e 28 de junho de 2019, diversas previsões sonares foram realizadas no âmbito dos exercícios ASW. No sentido de avaliar a aplicação da ferramenta SeaRider a bordo das unidades navais, vários testes foram realizados para comparação entre o *Raypath* e o SeaRider. A primeira “corrida” foi realizada na posição geográfica 38,8N e 11,8W e a segunda na posição 36,4N e 10,8W, tendo-se considerado os seguintes dados de entrada.

<u><i>Parâmetro</i></u>	<u><i>Valor Introduzido</i></u>
Raio inferior	-10°
Raio superior	3°
Imersão do transdutor	5 metros
Frequência de transmissão/receção	7,2 kHz
Nível de emissão (SL)	210 dB
Índex de diretividade (DI) de transmissão/receção	10 dB
Modo de operação sonar	Ativo e Passivo
Limiar de deteção (DT)	21 dB
Estado do mar	SS0
Densidade de navegação	Baixa
Precipitação	Inexistente
Fundo do mar	Areia com rocha
Índice de refletividade (TS) do alvo	5 dB

Fig.1. Parâmetros de entrada no SeaRider e *Raypath* para análise dos alcances de deteção e contra deteção.

Os dados obtidos, relativos aos alcances de deteção e contra deteção, foram compilados na **Fig.2.**, para permitir uma análise mais direta e simples dos resultados, no sentido de comparar as duas ferramentas operacionais.

<u><i>Posição</i></u>	<u><i>Modo de Operação Sonar</i></u>	<u><i>SeaRider</i></u>	<u><i>Raypath</i></u>
A	Ativo	5.946	7.900
	Passivo	53.154	41.000
B	Ativo	5.941	4.500-5.000
	Passivo	63.032	35.000

Figura 71: Alcances de deteção e contra deteção, para comparação das duas ferramentas operacionais. Valores em jardas.

Analisando os alcances obtidos das ferramentas operacionais, conclui-se que o *Raypath* apresenta valores bastante distintos do SeaRider, sendo de notar que para o sonar a operar em modo passivo apresenta sempre alcances inferiores, conclusão já retirada nos testes efetuados anteriormente. Tal poderá ter a sua origem no modo como são resolvidas as reverberações ou as perdas de transmissão, também a utilização de modelos para o cálculo de ruído próprio, ruído ambiente, interações com o fundo e/ou superfície e até a profundidade na área de operações podem contribuir para valores algo diferentes.

Visto que o modo de funcionamento do *Raypath* e modelos adotados para a modelação da acústica submarina são desconhecidos, sendo que este funciona como uma “caixa negra”, impede de conhecer como são resolvidas as físicas e acústicas envolvidas e avaliar, com algum critério, se o SeaRider é melhor ou pior que aquela ferramenta. O mesmo acontece para o modo de funcionamento passivo. Contudo, das experiências recolhidas pelos operadores a bordo dos navios, o *Raypath* fornece alcances bastante superiores do que aqueles a que os sonares conseguem detetar, quando este está presente, contudo o traçado de raios sonoros usado para melhorar o desempenho dos sensores de bordo foi um auxílio importante, coincidente com a realidade encontrada durante os exercícios. Um dos problemas encontrados a bordo, e que dificultou as previsões sonares, foi a sondas encontrarem-se fora do prazo de validade, sendo necessário recorrer à climatologia, podendo ser outra fonte para valores díspares entre as ferramentas.

Apêndice D – Artigo Publicado e Apresentado na Conferência Inter Noise 2019



Underwater Ambient Noise – An Estimation Methodology

Torres, Catarina

Escola Naval

Base Naval de Lisboa – Alfeite 2810-001 Almada

Costa, Carlos

Escola Naval

Base Naval de Lisboa – Alfeite 2810-001 Almada

ABSTRACT

The use of the submarine weapon in the various naval operations has increased significantly in the last decades. Due to their tactical advantages over other vessels, it is necessary to create tools supporting sonar forecasting and enabling underwater acoustics modeling. One of the variables that limit sonars performance is the so-called spectral ambient noise. There is a need to study the way in which it masks or affects the signal coming from the targets to be detected or the signal emitted by the acoustic system itself. In order to assign adequate values to ambient noise levels, existing graphics were analyzed, having in account the meteorological and oceanographic conditions, and the area navigation density; however, those do not include all meteorological and oceanographic conditions. In order to interpolate or extrapolate the existing data, to overcome such limitation, a software was created, with the help of the MATLAB tool, for a least squares data fitting. It is only necessary to introduce the operating frequency of the acoustic system, the wave height or sea state, precipitation level (absent, weak, moderate, strong or very

strong) and the navigation density (low, moderate or high). In the end, the program returns the value of spectral ambient noise.

Keywords: Noise, Underwater Acoustics, Sonar Forecasting

I-INCE Classification of Subject Number: 22

1. INTRODUCTION

In the scope of the naval military operations in order to warranty the use and control of the sea, in the context national and allied interest's defences and navies main missions, it becomes essential the knowledge and modelling of the submarine acoustics phenomena's improving the sonar forecasting capacity. One of these phenomena is the ambient noise, capable of reducing the probability of detection for half the distance in unfavourable conditions.

The underwater acoustics noise is classified taking into account the source which produces it. Due to the easiness with which sound waves propagate in this environment, through mechanical vibrations of the particles that constitute it, being able to reach large distances, along with the various existing sources, the underwater environment becomes quite noisy.

Ambient noise can be defined as the signal received by an acoustic system in the absence of signals that can be attributed to an individual source, such as ships, or resulting from the so-called self-noise, either from the system itself or from other sources related with the platform on which the hydrophone is installed.

The measurement or prediction of the ambient noise value is not an easy task, and it is necessary to remove the contribution of all sources of noise (propellers, auxiliary machines, generators and even the transducer itself) as well as the noise from individual ships that are navigating in the surrounding area. In other words, all sources that are identifiable must be removed, remaining only what we call background noise. This is the main challenge of this article, predict or estimate reliable values that can be attributed to ambient noise.

Several authors have studied this subject, with several measurements taken after World War II, when the submarine weapon became relevant to gain tactical advantage over the enemy. However, existing charts created after these measurements only apply to certain oceanographic and meteorological conditions. The final objective will be the construction

of a software tool to allow the creation of functions to adapt existing values to any conditions that ships may encounter at sea, with help of the least squares fitting.

2. SPECTRAL AMBIENT NOISE

The ambient noise level (ANL), used as a parameter in the sonar forecasting, corresponds to the sound pressure level, in dB, of ambient noise relative to a plane wave that has a pressure root mean square corresponding to 1 μ Pa. Although they are measured in different frequency bands, ambient levels are usually reduced to a 1 Hz frequency band or ambient noise spectrum levels (Urick, 1983, pp. 202).

The main sources of noise depend on the depth of the sea as well as the area being studied, therefore the need to distinguish shallow waters and deep waters⁹⁸. The main shallow water sources correspond to: ship traffic, industrial activity (more significative in bays and ports), wind and sea life (Urick, 1983, pp. 211-215).

The influence of ship traffic depends directly on the area in which we are navigating, being more relevant in navigation routes, traffic separation schemes, straits or choke points, bays, ports or in coastal and inner waters. It is also more relevant for lower operating frequencies, namely up to 0.5 kHz. However, up to 100 Hz is the dominant source of noise, and is independent of Meteorological and Oceanographic (METOC) conditions encountered by ships (Hodges 2010, pp. 131).

In bays and ports, industrial activity is more relevant because of its proximity to ships, one of the main sources contributing to the noise level. Also the marine life, the tides and the turbulence that characterizes these areas leads to a very noisy environment. In coastal waters, the main sources are the waves caused by the wind that are felt in the area, the breaking waves, marine life and maritime traffic. Sometimes the noise here originates at long distances and can then be detected in deep water. In fact, if we eliminate the effect of marine life and maritime traffic, the values obtained will be in agreement with those found in deep waters (Urick, 1983, pp. 212).

Concerning to biological noise, its influence was discovered during measurements in coastal areas, where marine life has a more significant presence. However, there are

⁹⁸ Shallow waters, in general, refer to bottom depths less than 200 meters, and deep waters to waters whose depths are greater than 200 meters (Richardson et al., 2013, pp.96)

species that most affect the sound received by hydrophones, to emphasize cetaceans, crustaceans and some larger fish (Varela, 2001, pp. 2-25).

In deep waters, there is a greater diversity of sources that depend directly on the frequency spectrum. With increasing frequencies, we have: tides and hydrostatic effect of waves, seismic disturbances, oceanic turbulence, nonlinear interactions between waves, waves generated by the wind and thermal noise (Urlick, 1983, pp. 203-209). There are also environmental phenomena that do not occur permanently, but which significantly influence environmental noise, such as rainfall.

Not always the sonars sensed pressure differences have a sound source, such as the tides and the hydrostatic effects of the waves, capable of causing large amplitude differences in the lower frequencies of the spectrum, reducing the useful signal received in the transducer. The surface waves also cause changes in the pressure, being this phenomenon more visible in places of smaller depth. The currents, in turn, cause changes in the temperature of the water, being this change felt in very low frequencies (Varela, 2001, pp. 2-25).

The noise resulting from the seismic activity presents greater variability and can result from earthquakes or volcanic eruptions whose origin is at the bottom and sub-bottom of the sea. Occurring quite frequently and with variable magnitude they affect, in a remarkable way, the lower spectrum of the frequencies, in deep waters. (Hodges 2010, pp. 128).

The turbulence associated and resulting from prevailing or transient currents (that may arise during a certain time) and the large-scale motion of the oceanic water masses, creates a background noise too. That turbulence will create pressure differences detectable by the sensors (Urlick, 1983, pp. 205).

Surface waves are one of the main phenomena that affect ambient noise and their influence can be detected up to 25 kHz, i.e. not only in the lower range of the spectrum. In the sonar operating frequencies still have very high values for the waves originated noise. There are charts that match the state of the sea to the noise value in dB, and this is one of the subjects that will be solved in this article. (Hodges 2010, pp. 131).

Assigning a value to the ambient noise level is not an easy task. There are charts that consider some of the aforementioned sources, taking into account the frequency of the

acoustic system operation, wind, precipitation and navigation density, an example of these graphs is presented in figure 1:

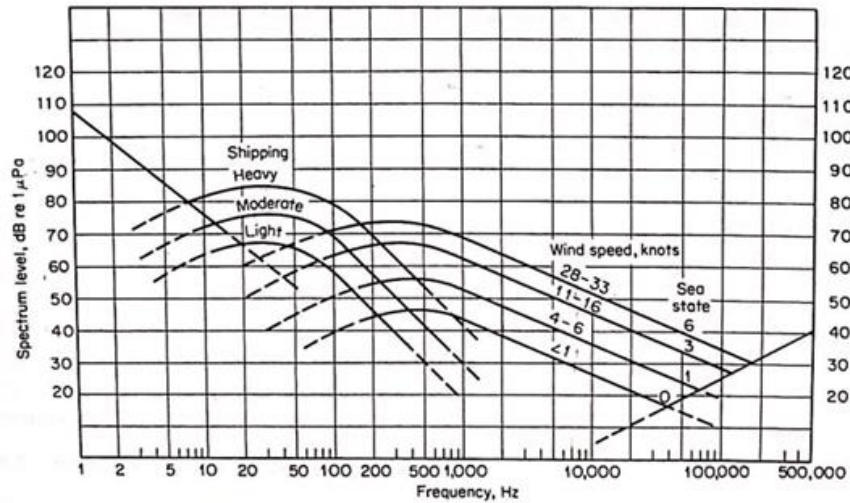


Figure 1: Spectral ambient noise for the ship traffic and wind speed of Urick 1983 (fig 7.5, p.210).

3. METHODS

3.1 Interpolation and Extrapolation

From the graphs of Urick 1984 (Figure 2-10, page 2-20), Urick 1983 (Figure 7.5, page 210), Kinsler *et al.* (1982, Figure 55.8, page 413) and Waite (2002, Figure 5.3, page 88), data interpolation and / or extrapolation was performed for all sea-state or wind, precipitation and shipping traffic values, for frequencies between 100 Hz and 10 kHz.

It is called interpolation the method that allows obtain a new set of data from a discrete set of previously known values. Extrapolation is the process of estimating, in addition (out of the range but nearby) to the original observation interval, the value of a variable based on its relation to another variable, which allows to estimate the values for sea state 7, 8 and 9.

This was achieved by reading the spectral noise level for the various frequencies, whose data are available, and it was necessary to carry out this process for the four mentioned sources. One limitation of these graphs is that only exist the curves for certain sea state (SS) or wind speed, which makes it impossible for the user to select the existing METOC conditions.

To solve this problem the interpolation or extrapolation of known values was used. For this purpose, a table was created for each graph used, where the dB value of the

ambient noise was inserted for each frequency and known sea state. For the missing curves it was considered that the variation between each one will be the same for close SS, and thus the tables were completed.

The final values used in the program correspond to an average of the data obtained from all the constructed tables. In the case of precipitation and density of the navigation not all the authors mention their influence, reason why we only considered those that present values for those sources of noise. From it resulted the graphic in figure 2:

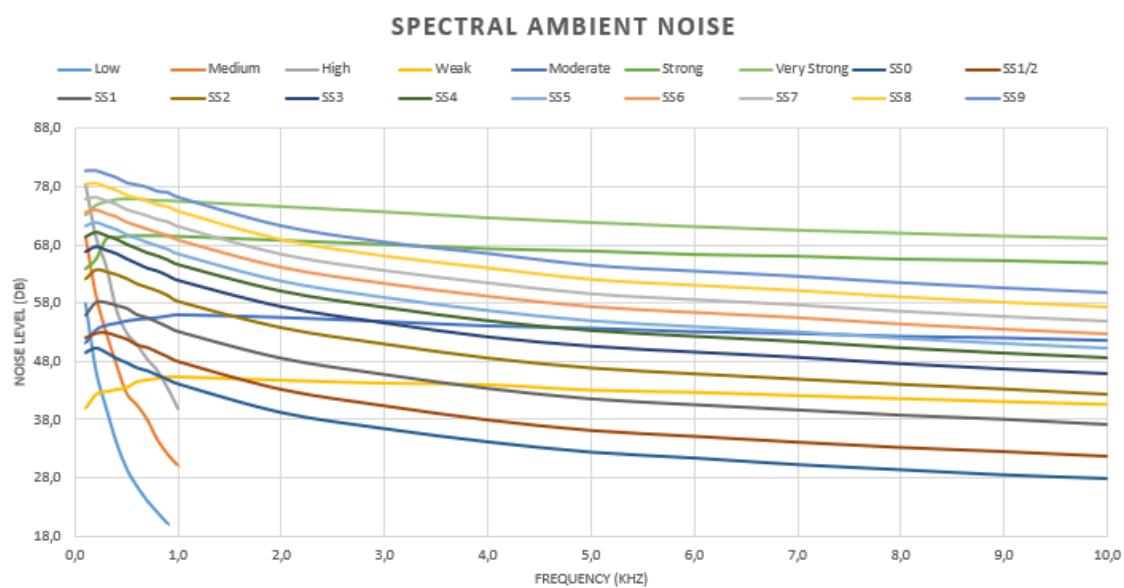


Figure 2: Spectral Noise Environment resulting from the extrapolation of the five sources mentioned for navigation density, sea state and precipitation.

In the Matlab program the `interp1` function was used for the interpolation of the final table or graph data for the whole spectrum, so that the software user introduces the frequency of the acoustic system instead of an approximation.

3.2 Hodges Data

The aforementioned process is subject to several errors, either due to misreading of the graphs and non-use of discrete data, or by the interpolation and extrapolation method used are not the most reliable. Thus, another process, by the least square fitting technique, was used. From discrete data (at given frequencies), allows to obtain functions, in this case as an independent frequency variable, allowing the user of the software to use the

frequency value of the sonar in question, obtaining the ambient noise value for the various conditions that can be encountered in operations at sea.

In order to collect data, Hodges 2010 book "Underwater Acoustics" was used, in which there are three tables: ship traffic (table 7.1, pp. 132), precipitation (table 7.3, pp. 136) and sea state or wind velocity (table 7.2, pp. 134). The tables provide for specific given frequencies the corresponding ambient noise spectrum levels. Since only a specific band of the spectrum is required for the operation of the sonars, only the values of interest for the scope of the work (from 0.1 kHz to 10 kHz) have been used.

Although we have discrete values, being less subject to errors, we want the user to use any frequency value and not an approximation, so we need to create functions using the least square fitting method.

However, in the case of sea state or wind speed, Hodges (2010) does not present data for all possible conditions to be found, hence an interpolation and extrapolation process has been applied to the existing values, similar to that explained in the previous subchapter.

3.3 Least Squares Fitting

Fitting requires a parametric model that relates the response data to the predictor data with one or more coefficients, in this case with four coefficients. The result of the fitting process is an estimate.

To obtain the coefficient estimates, the least-squares method minimizes the summed square of residuals. The residual for the data point is defined as the difference between the observed response value and the fitted response value, and is identified as the error associated with the data, which corresponds to the difference between the data measured by Hodges and those obtained by the approximation of a third-degree polynomial to those values.

Basically, the polynomial we want to get is the following, in which f means frequency:

$$y = a_0 + a_1f + a_2f^2 + a_3f^3$$

Equation 1: Third dregree polynomial.

Placing the matrix problem:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f_1 & f_1^2 & f_1^3 \\ 1 & f_2 & f_2^2 & f_2^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & f_n & f_n^2 & f_n^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}$$

Equation 2: The least square fitting in matrix.

In the above matrix we have:

- a is the vector of the coefficients of the third-degree polynomial to be obtained;
- F is the matrix that has as lines the value of the frequencies for which we have the ambient noise values, and as columns the frequencies raised to 0, 1, 2 and 3;
- y is the vector with known ambient noise values.

To solve this problem, it is necessary to transpose F matrix, so the equation is:

$$F^T y = F^T F a$$

Equation 3: The problem with F transpose.

Isolating vector a, which corresponds to the coefficients, we get:

$$a = (F^T F)^{-1} F^T y$$

Equation 4: Vector a.

The residual is given by:

$$R^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 f + a_2 f^2 + a_3 f^3)]^2$$

Equation 5: The residual.

3.4 The problem in MATLAB

In order to do the calculations mentioned in the previous subchapter it was necessary to create a code through Matlab. To avoid in this article the complete code of all the programming carried out, we just show the part to obtain the third degree polynomial for sea state 0 in the following lines.

```
freq=[0.1; 0.125; 0.16; 0.2; 0.25; 0.32; 0.4; 0.5; 0.64; 0.8; 1;
1.25;...
1.6; 2;2.5; 3.2; 4; 5; 6.4; 8; 10];
```

```

dim=size(freq);

f_0=zeros(dim(1,1),1);

%SS=0

for i=1:1:dim(1,1)
x=freq(i,1);
A_0=[1 0.1 0.1^2 0.1^3;...
1 0.125 0.125^2 0.125^3;...
1 0.16 0.16^2 0.16^3;...
1 0.2 0.2^2 0.2^3;...
1 0.25 0.25^2 0.25^3;...
1 0.32 0.32^2 0.32^3; ...
1 0.4 0.4^2 0.4^3; ...
1 0.5 0.5^2 0.5^3; ...
1 0.64 0.64^2 0.64^3; ...
1 0.8 0.8^2 0.8^3;...
1 1 1^2 1^3; ...
1 1.25 1.25^2 1.25^3; ...
1 1.6 1.6^2 1.6^3; ...
1 2 2^2 2^3; ...
1 2.5 2.5^2 2.5^3; ...
1 3.2 3.2^2 3.2^3;...
1 4 4^2 4^3; ...
1 5 5^2 5^3; ...
1 6.4 6.4^2 6.4^3;...
1 8 8^2 8^3; ...
1 10 10^2 10^3];

B_0=[50.9;                                     50.9;                                     50.8;
50.6;50.2;49.7;49;48.2;47.3;46;44.8;43.4;41.6;39.8;...
38.1;36.2; 34.3;32.6;30.8;28.9;27.1];

```

```

X_0=(A_0'*A_0)^(-1)*(A_0'*B_0);
f_0(i,1)=X_0(1)+X_0(2)*x+X_0(3)*x^2+X_0(4)*x^3;
end
disp(X_0)
Residuo_0=norm(f_0-B_0);

```

4. RESULTS

After applying the programming previously presented to all possible conditions, whether at the level of sea state or wind speed, ship traffic and precipitation, was obtained a set of functions, which are intended to be used in the acoustic model software project. The functions obtained are as follows:

For the sea state or wind speed:

SS0, wind 1.5 knots, wave 0 meters:

$$y = 51.8285 - 7.6227f + 0.9717f^2 - 0.0459f^3$$

SS1/2, wind 3.5 knots, wave 0.1 meters:

$$y = 55.0614 - 6.7208f + 0.8106f^2 - 0.0373f^3$$

SS1, wind 5 knots, wave 0.15 meters:

$$y = 58.262 - 5.7971f + 0.6462f^2 - 0.0285f^3$$

SS2, wind 8.5 knots, wave 0.46 meters:

$$y = 63.0914 - 4.6787f + 0.4188f^2 - 0.0154f^3$$

SS3, wind 13.5 knots, wave 0.91 meters:

$$y = 65.929 - 3.9829f + 0.2826f^2 - 0.0077f^3$$

SS4, wind 19 knots, wave 1.8 meters:

$$y = 67.6311 - 3.4708f + 0.1813f^2 - 0.002f^3$$

SS5, wind 24.5 knots, wave 3.6 meters:

$$y = 69.3144 - 3.1646f + 0.1114f^2 - 0.0023f^3$$

SS6, wind 37.5 knots, wave 5 meters:

$$y = 71.8288 - 3.0857f + 0.094f^2 + 0.0034f^3$$

SS7, wind 51.6 knots, wave 7.6 meters:

$$y = 74.3443 - 2.9611f + 0.0632f^2 + 0.0053f^3$$

SS8, wind 59.5 knots, wave 11.4 meters:

$$y = 76.8575 - 2.9279f + 0.0591f^2 + 0.0055f^3$$

SS9, wind 64 knots, wave 13.7 meters:

$$y = 79.3719 - 2.849f + 0.094f^2 + 0.0065f^3$$

For the ship traffic:

Low:

$$y = 50.7034 - 21.3545f + 3.5545f^2 - 0.1954f^3$$

Medium:

$$y = 64.5478 - 21.3145f + 3.3387f^2 - 0.1795f^3$$

High:

$$y = 77.9369 - 22.423f + 3.7548f^2 - 0.2043f^3$$

For the rain:

Weak (1mm/h):

$$y = 51.0769 + 1.4687f - 0.5232f^2 + 0.0335f^3$$

Moderate (5mm/h):

$$y = 61.5358 + 1.0147f - 0.4255f^2 + 0.0277f^3$$

Strong (10mm/h):

$$y = 65.1107 + 0.8226f - 0.3825f^2 + 0.0251f^3$$

Very Strong (100mm/h):

$$y = 74.3464 + 1.0131f - 0.4258f^2 + 0.0277f^3$$

With these functions that have been introduced in the main sonar prediction software, the user is able to select the current conditions without the need to approach them, reducing the errors that the modelling is subject to. Showing the results on a graphic we have:

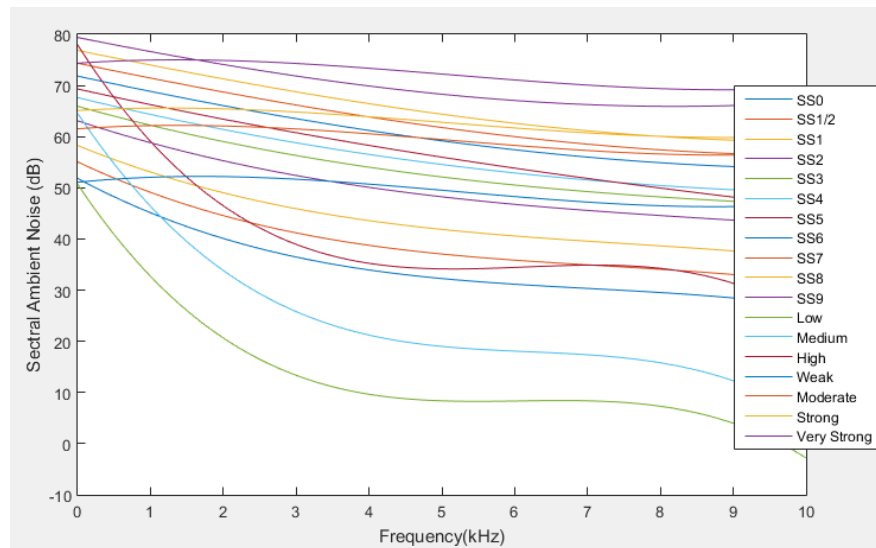


Figure 3: *Spectral Noise Environment resulting from the functions created with the least square fitting.*

Comparing the two graphs obtained by the described methods, we can conclude that the values are close, although in the case of the least squares method there are no abrupt variations of the data, since it becomes a function that describes them, besides the interpolation and extrapolation carried out from several sources, whose data are taken from different areas of the world, leading to greater variations.

It is also possible to observe in both graphs that the main source is the rain, followed by the state of the sea and finally the density of navigation. It should also be noted that by the first method the data on ship traffic exist only up to the frequency of 1 kHz, with the creation of functions it was possible to extend the data up to 10 kHz. In both cases the presence of noise is less noticeable to the upper part of the spectrum.

5. CONCLUSIONS

Thus, the spectral ambient noise presents a high variability, due mainly to the predominant source, be it density of navigation, precipitation, wind or sea state. In general, shallow waters may present a greater diversity of values due to the intermittent nature of the sources in these waters, being higher or lower depending on the time and area under study. In deep water there will be a tendency for spectral levels to be less variable.

The existing values for ambient noise already date back to the 80's, so today the reality may already be something different. Undoubtedly, the technological developments that have taken place in recent years contribute to the greater number of ships circulating in the various oceans, as well as their size, thus contributing to an increase in noise. The other sources mentioned, namely rainfall and sea state, have a great seasonality, but the different conditions that can be found are already described.

Due to the high variability of the ambient noise, in time and space, it is impossible to use a value that represents the reality found, being only possible to make an approximation.

Comparing the two methods used, in the first one only the interpolation and extrapolation of several sources was done, it has the disadvantage of comparing data from different areas of the world, however it allows to obtain an average value for all the oceans, still to mention that the data taken are graphs which implies more errors, since it does not allow a reliable reading of them.

Hodges comes to solve this question, since it presents discrete data, however these values measured in a certain area are then transposed to all the navigable areas. In addition, the use of the method of least squares presents greater reliability, since it allows the creation of functions, being not so subject to punctual variations of frequency.

In the final program the least squares method was used with discrete data presented by Hodges.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

For the accomplishment of an article it is necessary the help of countless people, who contribute directly or indirectly to the final result. Given the impossibility of thanking all, I will mention the most important ones.

To my thesis advisor Carlos Nélson Lopes da Costa, for the lessons that have been passed over the past few months, for the availability and the ever-open door office, without whom this work would not have been possible. The challenges have been many in the area of acoustics, but step by step been outdated.

To teachers Mário Gatta and Miguel Moreira, for help in the mathematical and physical challenges encountered, with whose wisdom I have always counted.

To the Portuguese Naval School and to the Portuguese Naval Research Center, for the support given for the accomplishment of this article.

7. REFERENCES

1. Richard P. Hodges, “*Underwater acoustics. Analysis, design and performance sonar*”, John Wiley & Sons, England (2010)
2. W. John Richardson et al., “*Marine mammals and noise*”, Academic Press (2013)
3. Robert J. Urick, “*Principles of Underwater Sound*”, McGraw-Hill Inc., United States of America (1983)
4. Robert J. Urick, “*Ambient Noise in the Sea*”, Naval Sea Systems Command Department of the Navy, United States of America (1984)
5. A.D. Waite, “*Sonar for practicing Engineers*”, John Wiley & Sons, England (2002)
6. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A.B. Coppens and J. V. Sanders, “*Fundamentals of Aconstic*”, John Wiley & Sons, England (1982)
7. A.J. Dionísio Varela, “*Apontamentos de Armas Submarinas e Sistemas de Detecção e Armamento Submarino*”, Escola Naval, Alfeite (2001)

Apêndice E – Artigo para o Encontro Anual de Ciências e Tecnologias Militares 2018, Instituto Universitário Militar, Lisboa, 12 de dezembro de 2019

RUÍDO ESPECTRAL AMBIENTE NA ACÚSTICA SUBMARINA

Técnicas e Tecnologias Militares

Cadete Ana Catarina Leitão Torres

Escola Naval e CINAV

Introdução:

O emprego da arma submarina nas diversas operações navais tem aumentado significativamente nas últimas décadas. Sendo de conhecimento geral as vantagens táticas que estes apresentam relativamente aos restantes navios, é necessário a criação de ferramentas de apoio à previsão sonar e que permitam a modelação da acústica submarina. Para tal, é necessário conhecer o ruído ambiente e o modo como este influencia o sinal proveniente dos alvos que se pretendem detectar (sonar passivo) ou o sinal emitido pelo próprio sistema acústico (sonar activo), sendo de salientar que no primeiro caso o efeito do ruído ambiente será bastante mais significativo. Assim, será necessário avaliar de que forma as condições meteorológicas (caso da precipitação) e oceanográficas, bem como a densidade de navegação irão influenciar o valor em decibéis (dB) do ruído espectral ambiente. Tal é conseguido através da entrada dos valores de frequência de operação do sistema acústico em causa, a altura da vaga / estado do mar ou força do vento, a precipitação (fraca, moderada, forte ou muito forte) e a densidade de navegação (baixa, moderada ou forte). Também a profundidade a que o sistema acústico está a operar vai introduzir alterações ao valor do mesmo.

Ruído Ambiente e Ruído Ambiente Espectral:

O ruído ambiente pode ser definido como o sinal recebido por um sistema acústico, na ausência de sinais aos quais pode ser atribuída uma fonte individual, tais como navios, ou que resultem do chamado *self-noise*, seja este do próprio sistema ou de outras fontes relacionadas com a plataforma em que este se encontra instalado.

Já o nível de ruído ambiente de banda (ANL), utilizado como parâmetro na previsão sonar, corresponde à intensidade em dB do ruído ambiente relativo a uma onda plana que possui uma pressão de referência, correspondente a 1 μPa (Urick, 1983, pp. 202).

As principais fontes de ruído dependem da profundidade a que se encontre o sistema acústico, bem como da área que está a ser alvo de estudo, daí a necessidade de distinguir *shallow waters*⁹⁹ e *deep waters*¹⁰⁰. Para as águas pouco profundas as principais fontes correspondem: ao tráfego de navios, à actividade industrial (mais concretamente em baías e portos), às ondas geradas pelo vento e à vida marinha (Urick, 1983, pp. 211-215).

Nas águas profundas, existe uma maior diversidade de fontes que dependem directamente do espectro de frequências, assim no sentido crescente das frequências temos: as marés e efeito hidrostático das ondas, perturbações sísmicas, turbulência oceânica, interacções não-lineares entre ondas, tráfego marítimo, ondas geradas pelo vento e ruído térmico (Urick, 1983, pp. 203-209). Existem ainda fenómenos ambientais que não se verificam permanentemente, mas que influenciam de forma relevante o ruído ambiente, dos quais é importante referir a chuva.

Atribuir um valor ao nível de ruído ambiente não é tarefa fácil, existindo gráficos que consideram algumas das fontes mencionadas, tendo em conta a frequência de operação do sistema acústico, o vento, a precipitação e a densidade de navegação.

Resolução do Problema:

Partindo dos gráficos de Urick 1984 (fig. 2-10, p. 2-20), Urick 1983 (fig. 7.5, p. 210 e Kinsler *et al.* (1982, fig. 55.8, p. 413), Hodges (2010, fig. 7.3, p. 130) e Waite (2002, fig. 5.3, p. 88), realizou-se uma interpolação e/ou extrapolação dos dados para todos os valores de estado do mar / vento, precipitação e densidade de navegação, para valores de frequência situados entre os 100 Hz e os 10 kHz.

⁹⁹ *Shallow Waters* correspondem a águas com pouca profundidade, nomeadamente com menos de 200 metros (Richardson *et al.*, 2013, pp.96).

¹⁰⁰ *Deep Waters* correspondem a águas cuja profundidade é superior a 200 metros.

Tal foi conseguido através da leitura do nível de ruído espectral para as diversas frequências, cujos dados se encontram disponíveis, sendo necessário realizar este processo para as cinco fontes mencionadas. Uma limitação destes gráficos é apenas serem apresentadas as curvas relativas a determinados estados do mar (SS) / vento, o que impossibilita ao utilizador de seleccionar quais as condições METOC existentes, havendo desta forma a necessidade de interpolar ou extrapolar os valores conhecidos. Para este efeito criou-se uma tabela para cada gráfico utilizado, onde foram inseridos, para cada frequência e estado do mar conhecido, o valor em dB do ruído ambiente. Para as curvas em falta considerou-se que a variação entre cada uma será a mesma para SS próximos, tendo-se assim completado as tabelas.

Os valores finais utilizados no programa correspondem a uma média dos dados obtidos e para os quais se construíram tabelas. No caso da precipitação e densidade da navegação nem todos os autores mencionam a sua influência, pelo que apenas se consideraram aqueles que apresentam valores para estas fontes de ruído, tendo resultado o seguinte gráfico:

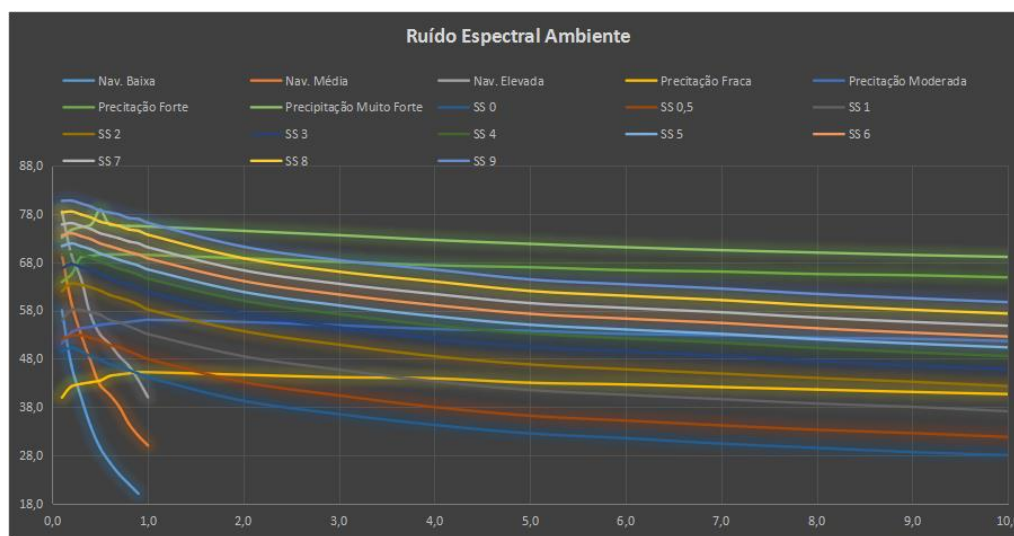


Figura 1: Ruído Espectral Ambiente resultante da extrapolação das cinco fontes mencionadas, para a densidade de navegação, estado do mar e precipitação.

No programa *Matlab* utilizou-se a função *interp1*¹⁰¹ para a interpolação dos dados da tabela / gráfico finais para todo o espectro, para que o utilizador do *software* utilize a frequência do sistema acústico em detrimento de uma aproximação.

Conclusões:

Assim, o ruído espectral ambiente apresenta uma elevada variabilidade, devido sobretudo à fonte predominante, seja esta densidade de navegação, precipitação ou o vento / estado do mar. De modo geral, em *shallow waters* pode apresentar uma maior diversidade de valores devido à natureza intermitente das fontes existentes nestas águas, podendo ser superior ou inferior em função do tempo e da área em estudo. Já em águas profundas haverá a tendência para que os níveis espectrais sejam menos variáveis.

Ainda de salientar que a não homogeneidade do oceano conduz a uma propagação não isotrópica do ruído, e apesar de se considerar a não existência de uma direcção tal não é coerente em águas profundas (Urlick, 1983, pp. 202).

Referências Bibliográficas:

HODGES, R., (2010), *Underwater acoustics. Analysis, design and performance sonar*, John Willey and Sons Ltd., Inglaterra, ed. 1.

KINSLER, L.E., FREY A.R., COPPENS A.B. e SANDERS, J.V. (1982), *Fundamentals of Acoustics*, 3rd ed., John Wiley & Sons, 1982.

URICK, R.J. (1983), *Principles of Underwater Sound*, 3.a ed., McGraw-Hill Book Company, 1983.

URICK, R.J. (1984), *Ambient Noise Level in the Sea*, Naval Sea Systems Command, Department of the Navy, Washington DC, 1984.

WAITE, A., (2002), *Sonar for Practicing Engineers*, John Willey and Sons Ltd., Inglaterra, ed. 3.

¹⁰¹ Função que devolve os valores interpolados através da entrada de valores específicos através de uma interpolação linear.

Apêndice F – Código do Programa

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                        %SeaRider%
                    %ASPOF M Leitão Torres%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function varargout = SeaRider_AtlanticoNorte(varargin)
% SEARIDER_ATLANTICONORTE MATLAB code for SeaRider_AtlanticoNorte.fig
%     SEARIDER_ATLANTICONORTE, by itself, creates a new
%     SEARIDER_ATLANTICONORTE or raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = SEARIDER_ATLANTICONORTE returns the handle to a new
%     SEARIDER_ATLANTICONORTE or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%     SEARIDER_ATLANTICONORTE('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls
%     the local
%     function named CALLBACK in SEARIDER_ATLANTICONORTE.M with the given
%     input arguments.
%
%     SEARIDER_ATLANTICONORTE('Property','Value',...) creates a new
%     SEARIDER_ATLANTICONORTE or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%     applied to the GUI before SeaRider_AtlanticoNorte_OpeningFcn gets
%     called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property application
%     stop. All inputs are passed to SeaRider_AtlanticoNorte_OpeningFcn via
%     varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help SeaRider_AtlanticoNorte

% Last Modified by GUIDE v2.5 18-May-2019 17:39:50

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @SeaRider_AtlanticoNorte_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @SeaRider_AtlanticoNorte_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});

```

```

else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
end

% --- Executes just before SeaRider_AtlanticoNorte is made visible.
function SeaRider_AtlanticoNorte_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to SeaRider_AtlanticoNorte (see VARARGIN)

% Choose default command line output for SeaRider_AtlanticoNorte
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes SeaRider_AtlanticoNorte wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

imersao=[0;5;10;15;20;25;30;35;40;45;50;55;60;65;70;75;80;85;90;...
    95;100;125;150;175;200;225;250;275;300];
temperatura=[18.5;17.5;16.5;15.5;14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;...
    14.5;...
    14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;14;13.5;13.25;13;13;...
    13;13;13];
velocidade=[1500;1500;1500;1500;1500;1499;1498;1497;1497;1496;1496;1495;...
    1494;1493;1493;1492;1492;1492;1492;1491;1491;1490;1488;1486;1485;...
    1485;1484;1483;1482];

set(handles.XBT_tabela,'Data',[imersao temperatura])
set(handles.XSV_tabela,'Data',[imersao velocidade])
%Coloca os gráficos dos perfis visíveis
set(handles.axes2,'visible','off')
set(handles.axes3,'visible','off')
set(handles.axes4,'visible','off')
set(handles.axes5,'visible','off')
set(handles.axes6,'visible','off')
set(handles.axes18,'visible','off')
set(handles.axes19,'visible','off')
set(handles.painel_escolha,'visible','on')
set(handles.ficheiro_nome,'visible','on')
set(handles.XBT_tabela,'visible','on')
set(handles.XSV_tabela,'visible','on')
set(handles.axes20,'visible','off')
set(handles.alcance,'visible','off')
set(handles.distancia,'visible','off')

%Limpar todos os gráficos:
axes(handles.axes3)
cla

```



```
axes(handles.axes4)
cla
axes(handles.axes5)
cla
axes(handles.axes6)
cla
axes(handles.axes2)
cla
axes(handles.axes18)
cla
axes(handles.axes19)
cla

%Criar cursor e atribuir regras para o mesmo
cursor=datacursormode;
set(cursor,'UpdateFcn',@nomear_cursor)

%Inicializa a escolha em anual 1º:
base_dados='Anual';
assignin('base','base_dados',base_dados);

%Inicializa a escolha em Atlantico Norte:
area='Oceano Atlântico Norte';
assignin('base','area',area);

%Inicializa com profundidade máxima em -1000metros:
max_profundidade=-1000;
assignin('base','max_profundidade',max_profundidade);

%Define o pH inicial como 8:
pH=8;
assignin('base','pH',pH);

%Define o ss inicial como 0:
SS=0;
assignin('base','SS',SS);

%Define a vaga inicial em pés como 0.1:
vaga_em_pes=0.1;
assignin('base','vaga_em_pes',vaga_em_pes);

%Define as perdas de fundo inicial como Rocha:
perdas_fundo=4;
assignin('base','perdas_fundo',perdas_fundo);

%Define a precipitação:
precipitacao='Ausência de Chuva';
assignin('base','precipitacao',precipitacao);

%Define a densidade de navegação:
densidade_navegacao='Baixa';
assignin('base','densidade_navegacao',densidade_navegacao);

%Define TS:
TS=5;
```

```
assignin('base','TS',TS);

%Define a velocidade própria como 18 nós
velocidade_propria=12;
assignin('base','velocidade_propria',velocidade_propria);

%Define a largura de banda
largura_de_banda=0.5;
assignin('base','largura_de_banda',largura_de_banda);

%Define a propagacao como esférico ou cilíndrica
escolha=1;
assignin('base','escolha',escolha);

TL_fator=1.65;
assignin('base','TL_fator',TL_fator);

raio_inferior=10;
assignin('base','raio_inferior',raio_inferior);

raio_superior=-3;
assignin('base','raio_superior',raio_superior);

frequencia=7;
assignin('base','frequencia',frequencia);

DT=21;
assignin('base','DT',DT);

SL=210;
assignin('base','SL_final',SL);

DI_rx=10;
assignin('base','DI_rx',DI_rx);

DI_tx=10;
assignin('base','DI_tx',DI_tx);

imersao_transdutor=1;
assignin('base','imersao_transdutor',imersao_transdutor);

indice_SL=1;
assignin('base','indice_SL',indice_SL);

sonar_func=1;
assignin('base','sonar_func',sonar_func);

BS_fundo=-27;
assignin('base','BS_fundo',BS_fundo);

latitude=-35;
assignin('base','latitude',latitude)

longitude=-40;
assignin('base','longitude',longitude)
```

```

azimute=270;
assignin('base','azimute',azimute)

distancia=50;
assignin('base','distancia',distancia)
end

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = SeaRider_AtlanticoNorte_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout    cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject      handle to figure
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
end

% --- Executes on selection change in basededados.
function base_de_dados_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to basededados (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns basededados
contents as cell array
%           contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from basededados
%Pretende-se criar uma dialog box para que o utilizador do software possa
%selecionar qual a base de dados que pretende usar:

dialog_box = dialog('Position',[400 400 500 150],'Name',...
    'Bases de dados WOD 2018');
txt_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','text','Position',...
    [50 80 400 40],'String',...
    'Selecione a base de dados que pretende utilizar da WOD2018');

popup_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','popup','Position',...
    [200 70 100 25], 'String',{'Anual';'Verão';'Inverno';'Janeiro';...
    'Fevereiro';'Março';'Abril';'Maio';'Junho';'Julho';'Agosto';...
    'Setembro';'Outubro';'Novembro';'Dezembro';'Anual 1/4°';...
    'Verão 1/4°';'Inverno 1/4°';},'Callback',@popupmenu_callback);

fecho_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Position',[200 30 100 25],...
    'String','Concluído','Callback','delete(gcf)');

end

%Atribuir à variável base de dados a escolha do utilizador no popupmenu
%anterior

function popupmenu_callback(popupmenu,event)

%Primeiro é necessário determinar qual é o índice da escolha que o

```

```

%utilizador fez:
indice = get(popupmenu, 'Value');

%Sabendo o índice da escolha pode-se determinar qual o nome da base de
%dados:
string = get(popupmenu, 'String');
base_dados = string{indice};

%Para posteriormente ser possível ler as bases de temperatura e salinidade
%da WOD 2018 é necessário guardar qual a base de dados que foi escolhida,
%visto que a mesma só será carregada para o Matlab para os perfis:

assignin('base', 'base_dados', base_dados);

end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function base_de_dados_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to basededados (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), ...
    get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

end

function longitude_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to longitude (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of longitude as text
%        str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of longitude
%as a double

end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function longitude_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to longitude (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), ...
    get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

```

```

end

function latitude_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to latitude (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of latitude as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of latitude as a
double

end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function latitude_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to latitude (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),...
    get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
end

function azimuth_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to azimuth (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of azimuth as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of azimuth as a
double

end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function azimuth_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to azimuth (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), ...
    get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
end

function distancias_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to distancias (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of distancias as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of distancias as a
double
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function distancias_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to distancias (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), ...
    get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
end

function aera_escolha_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to aera_escolha (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

%Pretende-se criar uma dialog box para que o utilizador do software possa
%selecionar qual a área em que pretende trabalhar:

dialog_box = dialog('Position',[400 400 500 150],'Name',...
    'Área Oceanográfica');
txt_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','text','Position',...
    [50 80 400 40],'String',...
    'Selecione a área em que pretende operar');

popup_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','popup','Position',...
    [150 70 200 25], 'String',{'Oceano Atlântico Norte';'Oceano Atlântico
Sul';...
    'Oceano Índico';'Mar Mediterrâneo';'ZEE de Portugal';'Mar do Norte';...
    'Costa Oeste da América do Sul';'Oceano Pacífico Sul até aos 180° W';...
    'Oceano Pacífico Norte até aos 180° E';...
    'Oceano Pacífico Sul até aos 180°E';},'Callback',@popupmenu2_callback);

fecho_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Position',[200 30 100 25],...
    'String','Concluído','Callback','delete(gcf)');
end

function popupmenu2_callback(popupmenu2,event)

%Primeiro é necessário determinar qual é o índice da escolha que o
%utilizador fez:
indice = get(popupmenu2,'Value');

%Sabendo o índice da escolha pode-se determinar qual a área

```

```
string = get(popupmenu2, 'String');
area = string{indice};

%Para posteriormente ser possível ler a área que foi escolhida é necessário
%guardar a mesma,%visto que a mesma só será carregada para o Matlab
%em perfil batimétrico:

assignin('base','area',area);

end

function Raio_inferior_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Raio_inferior (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Raio_inferior as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Raio_inferior
%         as a double

raio_inferior=str2double(get(hObject,'String'));
raio_inferior=-raio_inferior;
assignin('base','raio_inferior',raio_inferior);

end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Raio_inferior_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Raio_inferior (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), ...
    get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
end

function Raio_superior_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Raio_superior (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Raio_superior as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Raio_superior
%         as a double

raio_superior=str2double(get(hObject,'String'));
raio_superior=-raio_superior;
assignin('base','raio_superior',raio_superior);

end
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Raio_superior_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Raio_superior (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

end

function imersao_transdutor_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to imersao_transdutor (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of imersao_transdutor as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
%       imersao_transdutor as a double

imersao_transdutor=str2double(get(hObject,'String'));
assignin('base','imersao_transdutor',imersao_transdutor);

end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function imersao_transdutor_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to imersao_transdutor (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

end

% -----
function meio_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to meio (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
end

% -----
function alvo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to alvo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```



```

% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
end

% -----
function plataforma_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to plataforma (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
end

% -----
function velocidade_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to velocidade (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
dialog_box = dialog('Position',[400 400 500 150],'Name',...
    'Velocidade Própria');

txt = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','text','Position',[140 80 210
40],...
    'String','Selecione a velocidade do navio:');

edit = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','edit','Position',[200 70 100
25],...
    'Callback',@velocidade);

fecho_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Position',[200 30 100 25],...
    'String','Concluído','Callback','delete(gcf)');
end

function velocidade(hObject, event)

current_string = get(hObject, 'String');

velocidade_propria=str2double(current_string);

assignin('base','velocidade_propria',velocidade_propria);
end

% -----
function tipo_propulsao_propria_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to tipo_propulsao_propria (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
dialog_box = dialog('Position',[400 400 500 150],'Name',...
    'Tipo de Propulsão');
txt_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','text','Position',...
    [50 80 400 40],'String',...
    'Selecione o tipo de propulsão do navio:');

popup_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','popup','Position',...
    [200 70 100 25], 'String',{'Diesel','Diesel-Elétrico';...
    'Turbinas a gás';},'Callback',@popupmenu3_callback);

fecho_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Position',[200 30 100 25],...

```

```

        'String','Concluído','Callback','delete(gcf)');

end

function popupmenu3_callback(popupmenu3,event)

%Primeiro é necessário determinar qual é o índice da escolha que o
%utilizador fez:
indice = get(popupmenu3,'Value');

%Sabendo o índice da escolha pode-se determinar qual o nome da base de
%dados:
string = get(popupmenu3,'String');
tipo_propulsao_propria = string{indice};

%Para posteriormente ser possível ler as bases de temperatura e salinidade
%da WOD 2018 é necessário guardar qual a base de dados que foi escolhida,
%visto que a mesma só será carregada para o Matlab para os perfis:

assignin('base','tipo_propulsao_propria',tipo_propulsao_propria);

end
% -----
function tipo_propulsao_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to tipo_propulsao_propria (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
dialog_box = dialog('Position',[400 400 500 150],'Name',...
    'Tipo de Propulsão');
txt_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','text','Position',...
    [50 80 400 40],'String',...
    'Selecione o tipo de propulsão do navio:');

popup_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','popup','Position',...
    [200 70 100 25], 'String',{'Diesel','Diesel-Elétrico';...
    'Turbinas a gás';},'Callback',@SS_callback);

fecho_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Position',[200 30 100 25],...
    'String','Concluído','Callback','delete(gcf)');

end

function popupmenu4_callback(popupmenu4,event)

%Primeiro é necessário determinar qual é o índice da escolha que o
%utilizador fez:
indice = get(popupmenu4,'Value');

%Sabendo o índice da escolha pode-se determinar qual o nome da base de
%dados:
string = get(popupmenu4,'String');
tipo_propulsao = string{indice};

%Para posteriormente ser possível ler as bases de temperatura e salinidade
%da WOD 2018 é necessário guardar qual a base de dados que foi escolhida,

```

```

%visto que a mesma só será carregada para o Matlab para os perfis:

assignin('base','tipo_propulsao',tipo_propulsao);

end

% -----
function TS_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TS (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

dialog_box = dialog('Position',[400 400 500 150],'Name',...
    'Target Strength');

txt = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','text','Position',[140 80 210
40],...
    'String','Selecione a Target Strength do alvo:');

edit = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','edit','Position',[200 70 100
25],...
    'Callback', @TS_alvo);

fecho_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Position',[200 30 100 25],...
    'String','Concluído','Callback','delete(gcf)');
end

function TS_alvo(hObject, event)

current_string = get(hObject, 'String');

TS=str2double(current_string);

assignin('base','TS',TS);

end

% -----
function SS_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to SS (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
dialog_box = dialog('Position',[400 400 500 150],'Name',...
    'Precipitação');
txt_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','text','Position',...
[50 80 400 40],'String',...
    'Selecione o nível de precipitação:');

popup_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','popup','Position',...
[200 70 100 25], 'String',{...
    'SS0 Vento:1.5 nós Vaga:0m';      'SS1/2 Vento:3.5 nós Vaga:0.1m';...
    'SS1 Vento:5 nós Vaga:0.15m';    'SS2 Vento:8.5 nós Vaga:0.46m';...
    'SS3 Vento:13.5 nós Vaga:0.91m'; 'SS4 Vento:19 nós Vaga:1.8m';...
    'SS5 Vento:24.5 nós Vaga:3.2m';  'SS6 Vento:37.5 nós Vaga:5m';...
    'SS7 Vento:51.5 nós Vaga:7.6m';  'SS8 Vento:59.5 nós Vaga:11.4m';...

```

```

        'SS9 Vento:64 nós Vaga:13.7m'};}, 'Callback', @SS_callback);

fecho_box = uicontrol('Parent', dialog_box, 'Position', [200 30 100 25], ...
    'String', 'Concluído', 'Callback', 'delete(gcf)');
end

function SS_callback(SS, event)

%Primeiro é necessário determinar qual é o índice da escolha que o
%utilizador fez:
indice = get(SS, 'Value');

if indice==1      vaga_em_pes=0.1;          SS=0;
elseif indice==2  vaga_em_pes=0.1*3.281;    SS=0.5;
elseif indice==3  vaga_em_pes=0.15*3.281;   SS=1;
elseif indice==4  vaga_em_pes=.46*3.281;    SS=2;
elseif indice==5  vaga_em_pes=.91*3.281;    SS=3;
elseif indice==6  vaga_em_pes=1.8*3.281;    SS=4;
elseif indice==7  vaga_em_pes=3.2*3.281;    SS=5;
elseif indice==8  vaga_em_pes=5*3.281;      SS=6;
elseif indice==9  vaga_em_pes=7.6*3.281;    SS=7;
elseif indice==10 vaga_em_pes=11.4*3.281;   SS=8;
elseif indice==11 vaga_em_pes=13.7*3.281;   SS=9;
end

assignin('base', 'SS', SS);
assignin('base', 'vaga_em_pes', vaga_em_pes);
end

% -----
function precipitacao_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to precipitacao (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

dialog_box = dialog('Position', [400 400 500 150], 'Name', ...
    'Precipitação');
txt_box = uicontrol('Parent', dialog_box, 'Style', 'text', 'Position', ...
    [50 80 400 40], 'String', ...
    'Selecione o nível de precipitação:');

popup_box = uicontrol('Parent', dialog_box, 'Style', 'popup', 'Position', ...
    [200 70 100 25], 'String', {'Ausência de Chuva'; 'Fraca (1mm/h)'; 'Moderada
    (5mm/h)'; ...
    'Forte (10mm/h)'; 'Muito Forte
    (100mm/h)'};}, 'Callback', @popupmenu5_callback);

fecho_box = uicontrol('Parent', dialog_box, 'Position', [200 30 100 25], ...
    'String', 'Concluído', 'Callback', 'delete(gcf)');

end

function popupmenu5_callback(popupmenu5, event)

%Primeiro é necessário determinar qual é o índice da escolha que o
%utilizador fez:

```

```

indice = get(popupmenu5, 'Value');

%Sabendo o índice da escolha pode-se determinar qual o nome da base de
%dados:
string = get(popupmenu5, 'String');
precipitacao = string{indice};

%Para posteriormente ser possível ler as bases de temperatura e salinidade
%da WOD 2018 é necessário guardar qual a base de dados que foi escolhida,
%visto que a mesma só será carregada para o Matlab para os perfis:

assignin('base', 'precipitacao', precipitacao);
end

% -----
function densidade_navegacao_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to densidade_navegacao (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

dialog_box = dialog('Position', [400 400 500 150], 'Name', ...
    'Densidade de Navegação');
txt_box = uicontrol('Parent', dialog_box, 'Style', 'text', 'Position', ...
    [50 80 400 40], 'String', ...
    'Selecione a densidade de navegação:');

popup_box = uicontrol('Parent', dialog_box, 'Style', 'popup', 'Position', ...
    [200 70 100 25], 'String', {'Baixa'; 'Média'; ...
    'Elevada';}, 'Callback', @popupmenu6_callback);

fecho_box = uicontrol('Parent', dialog_box, 'Position', [200 30 100 25], ...
    'String', 'Concluído', 'Callback', 'delete(gcf)');

end

function popupmenu6_callback(popupmenu6, event)

%Primeiro é necessário determinar qual é o índice da escolha que o
%utilizador fez:
indice = get(popupmenu6, 'Value');

%Sabendo o índice da escolha pode-se determinar qual o nome da base de
%dados:
string = get(popupmenu6, 'String');
densidade_navegacao = string{indice};

assignin('base', 'densidade_navegacao', densidade_navegacao);
end

% -----
function fundo_mar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to fundo_mar (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

dialog_box = dialog('Position',[400 400 500 150],'Name',...
    'Fundo do mar');

txt = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','text','Position',[140 80 210
40],...
    'String','Selecione o tipo de fundo do mar:');

popup_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','popup','Position',...
    [200 70 100 25], 'String',{'Areia Fina(3dB)';
    'Rocha (4dB)';'Areia com Rocha (6dB)';...
    'Areia Grossa (8dB)'; 'Lodo (14dB)'};,'Callback',@popupfundo_callback);

fecho_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Position',[200 30 100 25],...
    'String','Concluído','Callback','delete(gcf)');

end

function popupfundo_callback(popupfundo,event)

%Primeiro é necessário determinar qual é o índice da escolha que o
%utilizador fez:
indice = get(popupfundo,'Value');

if indice==1
    perdas_fundo=3;
    BS_fundo=-40;
elseif indice==2
    perdas_fundo=4;
    BS_fundo=-27;
elseif indice==3
    perdas_fundo=6;
    BS_fundo=-33;
elseif indice==4
    perdas_fundo=8;
    BS_fundo=-36;
elseif indice==5
    perdas_fundo=14;
    BS_fundo=-45;
end;

assignin('base','perdas_fundo',perdas_fundo);
assignin('base','BS_fundo',BS_fundo);
end

% -----
function pH_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pH (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

dialog_box = dialog('Position',[400 400 500 150],'Name',...
    'pH');

txt = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','text','Position',[140 80 210
40],...

```

```

'String','Selecione o pH da água do mar:');

edit = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','edit','Position',[200 70 100
25],...
    'Callback', @pH);

fecho_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Position',[200 30 100 25],...
    'String','Concluído','Callback','delete(gcf)');
end

function pH(hObject, event)

current_string = get(hObject, 'String');

pH=str2double(current_string);

assignin('base','pH',pH);
end

% --- Executes on selection change in popupmenu2.
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu2 contents
as cell array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from popupmenu2
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
end

% -----
function base_dados_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to base_dados (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
end

% --- Executes on button press in XSV_dados.
function XSV_dados_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to XSV_dados (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of XSV_dados
end

% --- Executes on button press in BT_dados.
function BT_dados_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to BT_dados (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of BT_dados
end

% --- Executes on button press in CSV_dados.
function CSV_dados_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to CSV_dados (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of CSV_dados
end

% --- Executes on button press in XBT_dados.
function XBT_dados_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to XBT_dados (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of XBT_dados
end

function nome_CTD_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to nome_CTD (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of nome_CTD as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of nome_CTD as a
double

nome_CTD= get(hObject, 'String');
assignin('base','nome_CTD',nome_CTD);
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function nome_CTD_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to nome_CTD (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

```



```

%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

end

% --- Executes on selection change in SL_opcao.
function SL_opcao_Callback(SL_opcao, eventdata, handles)
% hObject      handle to SL_opcao (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns SL_opcao contents
as cell array
%       contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from SL_opcao

indice_escolha = get(SL_opcao,'Value');

if indice_escolha==1

    prompt={'Valor SL:'};
    dlg_title='Introdução valor de SL:';
    defaultans={'200'};
    answer=inputdlg(prompt,dlg_title,[1 40],defaultans,'on');
    SL_final=str2double(answer(1));
    indice_SL=1
    assignin('base','indice_SL',indice_escolha)
    assignin('base','SL_final',SL_final)

else indice_escolha==2

    prompt={'Potência em Watts','Altura do array em metros',...
        'Diâmetro do array em metros'};
    dlg_title='Introdução valores do Sonar';
    defaultans={'300','2','1'};
    answer=inputdlg(prompt,dlg_title,[1 40],defaultans,'on');
    P_SL=str2double(answer(1));
    h_SL=str2double(answer(2));
    d_SL=str2double(answer(3));

    assignin('base','P_SL',P_SL)
    assignin('base','h_SL',h_SL)
    assignin('base','d_SL',d_SL)
    indice_SL=2
    assignin('base','indice_SL',indice_escolha)
    SL_final=50
    assignin('base','SL_final',SL_final)
end

end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function SL_opcao_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to SL_opcao (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
end

% --- Executes on selection change in sonar_funcionamento.
function sonar_funcionamento_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to sonar_funcionamento (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns sonar_funcionamento
contents as cell array
% contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
sonar_funcionamento

indice_sonar = get(hObject,'Value');

assignin('base','sonar_func',indice_sonar);
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sonar_funcionamento_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to sonar_funcionamento (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
end

% --- Executes on button press in xbt.
function xbt_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to xbt (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of xbt

%Limpar todos os gráficos:
axes(handles.axes3)
cla
axes(handles.axes4)
cla
axes(handles.axes5)
cla

```

```

axes(handles.axes6)
cla
axes(handles.axes19)
cla
axes(handles.axes2)
cla
axes(handles.axes18)
cla

%Colocar apenas o gráfico 2 (perfil batimétrico) visível:
set(handles.axes19,'visible','off')
set(handles.axes2,'visible','off')
set(handles.axes2,'visible','off')
set(handles.axes3,'visible','off')
set(handles.axes4,'visible','off')
set(handles.axes5,'visible','off')
set(handles.axes6,'visible','off')
set(handles.axes20,'visible','off')
set(handles.painel_escolha,'visible','on')
set(handles.ficheiro_nome,'visible','on')
set(handles.XBT_tabela,'visible','on')
set(handles.XSV_tabela,'visible','on')
set(handles.alcance,'visible','off')
set(handles.distancia,'visible','off')

imersao=[0;5;10;15;20;25;30;35;40;45;50;55;60;65;70;75;80;85;90;...
    95;100;125;150;175;200;225;250;275;300];
temperatura=[18.5;17.5;16.5;15.5;14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;...
    14.5;...
    14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;14.5;13.5;13.25;13;13;...
    13;13;13];
velocidade=[1500;1500;1500;1500;1500;1499;1498;1497;1497;1496;1496;1495;...
    1494;1493;1493;1492;1492;1492;1492;1491;1491;1490;1488;1486;1485;...
    1485;1484;1483;1482];

set(handles.XBT_tabela,'Data',[imersao temperatura])
set(handles.XSV_tabela,'Data',[imersao velocidade])

end
% -----
function transmissao_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to transmissao (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

dialog_box = dialog('Position',[400 400 500 150],'Name',...
    'Tipo de Propagação');

txt = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','text','Position',[140 80 210
40],...
    'String','Selecione o tipo de propagação:');

popup_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','popup','Position',...
    [200 70 100 25], 'String',{'Esférico-Cilíndrica';
    'Separação Vertical de Raios';},'Callback',@propagacao_callback);

```

```

fecho_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Position',[200 30 100 25],...
    'String','Concluído','Callback','delete(gcf)');

end

% --- Executes on selection change
function propagacao_callback(hObject,event)
% hObject
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns SL_opcao contents
as cell array
% contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from SL_opcao
escolha = get(hObject,'Value');

if escolha==1

    prompt={'Introdução do fator de propagação (2-Esférica até 1-
Cilíndrica):'};
    dlg_title='Propagação Esférico Cilindrica: ';
    defaultans={'1.65'};
    answer=inputdlg(prompt,dlg_title,[1 40],defaultans,'on');
    TL_fator=str2double(answer(1));
    assignin('base','escolha',escolha)
    assignin('base','TL_fator',TL_fator)

else escolha==2
    assignin('base','escolha',escolha)

end
end

% -----
function manual_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to manual (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
end

function freq_transmissao_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to freq_transmissao (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of freq_transmissao as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
freq_transmissao as a double

frequencia=str2double(get(hObject,'String'));
assignin('base','frequencia',frequencia);
end

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function freq_transmissao_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to freq_transmissao (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

end

function freq_rececao_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to freq_rececao (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of freq_rececao as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of freq_rececao as
a double
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function freq_rececao_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to freq_rececao (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

end

function SL_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to SL (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of SL as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of SL as a double
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function SL_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to SL (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

end

function DI_tx_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to DI_tx (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of DI_tx as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of DI_tx as a
double
DI_tx=str2double(get(hObject,'String'));
assignin('base','DI_tx',DI_tx);
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function DI_tx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to DI_tx (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

end

function DI_rx_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to DI_rx (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of DI_rx as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of DI_rx as a
double

DI_rx=str2double(get(hObject,'String'));
assignin('base','DI_rx',DI_rx);
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function DI_rx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to DI_rx (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
end

function DT_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to DT (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of DT as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of DT as a double

DT=str2double(get(hObject,'String'));
assignin('base','DT',DT);
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function DT_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to DT (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
end

% -----
function largura_banda_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to largura_banda (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

dialog_box = dialog('Position',[400 400 500 150],'Name',...
    'Largura de Banda');

txt = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','text','Position',[140 80 210
40],...
    'String','Selecione a Largura de Banda:');

edit = uicontrol('Parent',dialog_box,'Style','edit','Position',[200 70 100
25],...
    'Callback', @largura_banda);

fecho_box = uicontrol('Parent',dialog_box,'Position',[200 30 100 25],...
```

```

        'String','Concluído','Callback','delete(gcf)');
end

function largura_banda(hObject, event)

current_string = get(hObject, 'String');

largura_de_banda=str2double(current_string);

assignin('base','largura_de_banda',largura_de_banda);
end

% --- Executes on button press in perfil_batimetrico.
function perfil_batimetrico_Callback(hObject, ~, handles)
% hObject      handle to perfil_batimetrico (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of perfil_batimetrico

%Limpar todos os gráficos:
axes(handles.axes3)
cla
axes(handles.axes4)
cla
axes(handles.axes5)
cla
axes(handles.axes6)
cla
axes(handles.axes19)
cla
axes(handles.axes2)
cla
axes(handles.axes18)
cla
axes(handles.axes20)
cla
%Colocar apenas o gráfico 2 (perfil batimétrico) visível:
set(handles.axes19,'visible','off')
set(handles.axes18,'visible','off')
set(handles.axes2,'visible','on')
set(handles.axes3,'visible','off')
set(handles.axes4,'visible','off')
set(handles.axes5,'visible','off')
set(handles.axes6,'visible','off')
set(handles.painel_escolha,'visible','off')
set(handles.ficheiro_nome,'visible','off')
set(handles.XBT_tabela,'visible','off')
set(handles.XSV_tabela,'visible','off')
set(handles.axes20,'visible','off')
set(handles.alcance,'visible','off')
set(handles.distancia,'visible','off')

```



```
%Pretende-se apresentar a batimetria dos oceanos para diferentes áreas do
nosso
%planeta, para tal foi utilizada a base de dados da GEBCO 2014:

longitudei=ncread('GEBCO_2014_2D_AtlanticoNorte.nc','lon');
latitudei=ncread('GEBCO_2014_2D_AtlanticoNorte.nc','lat');
elevation=ncread('GEBCO_2014_2D_AtlanticoNorte.nc','elevation');

%Cálculo da máxima profundidade:
max_profundidade=min(elevation)

%Cálculo do incremento da latitude
inclatitude=(max(latitudei)-min(latitudei))/(length(latitudei)-1);

%Cálculo do incremento da longitude
inclongitude=(max(longitudei)-min(longitudei))/(length(longitudei)-1);

%Para os cálculos foi utilizado como referência o Manual de Hidrografia de
%Barahona Fernandes, das páginas 22 à 26.
latitude=get(handles.latitude,'String');
latitude=str2double(latitude);

%Para cálculos de trigonometria é necessário converter de graus para
%radianos através da função degtorad
latitude = degtorad(latitude);
longitude=get(handles.longitude,'String');
longitude=str2double(longitude);

%Para cálculos de trigonometria é necessário converter de graus para
%radianos através da função degtorad
longitude = degtorad(longitude);

%Entrada do azimute, de 0° a 360° no sentido horário:
azimute=get(handles.azimute,'String');
azimute=str2double(azimute);

%Nas fórmulas o azimute é medido de 0° a 360°, a contar de Sul no sentido
%retrógrado, pelo que é necessário fazer as devidas correções:
if azimute<=180
    azimute=azimute-180;
else azimute=azimute+180;
end

%Para cálculos de trigonometria é necessário converter de graus para
%radianos através da função degtorad
azimute = degtorad(azimute);

%Introduzir a distância até à qual se pretende obter o perfil batimétrico:
distancia=get(handles.distancias,'String');
distancia=str2double(distancia);

%Cálculo dos incrementos:
```

```

% Incrementos entre longitudes e latitudes na malha
inc_long=(max(longitudei)-min(longitudei))/(length(longitudei)-1);
inc_lat=(max(latitudei)-min(latitudei))/(length(latitudei)-1);

% Encontra os índices de longitude e de latitude e a profundidade
% correspondente à posição geográfica pontual escolhida
ind_long=round((longitude-min(longitudei))/inc_long+1);
ind_lat=round((latitude-min(latitudei))/inc_lat+1);

%Introduzir qual o incremento para a distância:
inc_distancia=0.5;

%Existe agora a necessidade de passar os dados anteriores para metros:
distancia=distancia*1852;
inc_distancia=inc_distancia*1852;

%Dimensão:
dim=distancia/inc_distancia+1;

%Matriz:
profundidade_perfil=zeros(dim,1);

%Calcular a dimensão da matriz profundidade:
dim=distancia/inc_distancia+1;

for dist_geodesica=0:inc_distancia:distancia

%Entrada do comprimento da linha geodésica:
geodesica=dist_geodesica; %Corresponde à distância mais curta entre dois
pontos de
%uma superfície, no caso do elipsóide é a linha torsa, em todos os pontos
%normal ao mesmo

%É necessário ainda dois dados adicionais, o semi-eixo maior e o achatamento
%do elipsóide, para tal utilizou-se os valores do elipsóide de Hayford de
1924:

eixomaior=6378388; %Em metros
achatamento=0.003367;

%Cálculo Semi-eixo menor:
eixomenor=eixomaior-achatamento*eixomaior;

%Cálculo da Excentricidade:
excentricidade=sqrt(2*achatamento-(achatamento)^2);

%Cálculo da Curvatura Meridiana:
R=(eixomaior*(1-excentricidade^2))/((1-
(excentricidade^2)*(sin(latitude)^2))^(3/2));

%Cálculo da Curvatura do Paralelo:
N=(eixomaior)/((1-(excentricidade^2)*(sin(latitude)^2))^(1/2));

%Cálculo da Curvatura da Secção Normal:

```

```

Rang=(R*N)/(R*(sin(azimute)^2)+N*(cos(azimute)^2));

%Cálculo da esfera de igual curvatura do elipsóide:
Rm=sqrt(R*N);

%Cálculo do Raio do Paralelo:
r=N*cos(latitude);

%Cálculo do A:
A=(1)/(N*sin(degtorad(1/3600)));

%Cálculo do B:
B=(1)/(R*sin(degtorad(1/3600)));

%Cálculo do C:
C=(tan(latitude))/(2*R*N*sin(degtorad(1/3600)));

%Cálculo do D:
D=(3*(excentricidade^2)*sin(latitude)*cos(latitude)*sin(degtorad(1/3600))...
    /(2*(1-(excentricidade^2)*(sin(latitude)^2)));

%Cálculo do E:
E=(1+3*(tan(latitude)^2))/(6*N^2);

%Cálculo do h:
h=geodesica*cos(azimute)*B;

%Cálculo da diferença de latitude:
diflatitude=-geodesica*cos(azimute)*B-(geodesica^2)*(sin(azimute)^2)*C;

%Cálculo do delta latitude:
deltalatitude=-geodesica*cos(azimute)*B-(geodesica^2)*(sin(azimute)^2)*C...
    -(diflatitude^2)*D+h*(geodesica^2)*(sin(azimute)^2)*E;

%Como o valor está em segundos é necessário passar para graus para tal basta
%dividir o valor obtido por 3600 (número de segundos que um grau possui)
deltalatitude=deltalatitude/3600;

%Cálculo da latitude final:
latitudefinal=radtodeg(latitude)+deltalatitude;

%Cálculo do N linha:
Nlinha=(eixomaior)/((1-
    (excentricidade^2)*(sin(degtorad(latitudefinal))^2))^(1/2));

%Cálculo Alinha:
Alinha=(1)/(Nlinha*sin(degtorad(1/3600)));

%Para cálculos de trigonometria é necessário converter de graus para
%radianos através da função degtorad
latitudefinal = degtorad(latitudefinal);

%Cálculo do logaritmo do delta de longitude:
loglongitude=log10(geodesica)+log10(abs(sin(azimute)))+log10(abs(Alinha))...
    +log10(abs(sec(latitudefinal)));

```

```

%Cálculo do delta longitude:
deltalongitude=10^(loglongitude);

%Como o valor está em segundos é necessário passar para graus para tal basta
%dividir o valor obtido por 3600 (número de segundos que um grau possui)
deltalongitude=deltalongitude/3600;

%Cálculo da longitude final:
if radtodeg(azimute)<=180
    longitudefinal=radtodeg(longitude)+deltalongitude;
else
    longitudefinal=radtodeg(longitude)-deltalongitude;
end

%Cálculo do F:
F=(1/12)*sin((latitude+latitudefinal)/2)*(cos((latitude+latitudefinal)/2)^2)...
.
    *(sin(degtorad(1/3600))^2);

%Cálculo do delta azimute:
deltaazimute=-deltalongitude*3600*sin((latitude+latitudefinal)/2)*...
    sec(degtorad(deltalatitude)/2)-((deltalongitude*3600)^3*F);

%Conversão em graus:
deltaazimute=deltaazimute/3600;

%Calculo auxiliar do azimute:
if (deltaazimute+radtodeg(azimute)+180)<360
    azimuteaux=deltaazimute+radtodeg(azimute)+180;
else
    azimuteaux=deltaazimute+radtodeg(azimute)+180-360;
end

%Como os azimutes são de 0° a 360° no sentido horário, é necessário fazer a
%correção de 180°, visto que antes eles são contados a partir de Sul:
if (azimuteaux+180)<360
    azimutefinal=azimuteaux+180;
else
    azimutefinal=azimuteaux+180-360;
end

%Conversão da latitude final para graus:
latitudefinal = radtodeg(latitudefinal);

%Cálculo dos índices da latitude:
indicelatitude=round((latitudefinal-min(latitudei))/(inclatitude)+1);

%Cálculo dos índices da longitude:
indicelongitude=round((longitudefinal-min(longitudei))/(inclongitude)+1);

%Cálculo dos índices da profundidade:
indiceprofundidade=round((dist_geodesica)/(inc_distancia)+1);
profundidade_perfil(indiceprofundidade)=elevation(indicelongitude,indicelatitude)

```

```

end

%Apresentar os gráfico obtidos:
dist_geodesica=0:inc_distancia:distancia;
axes(handles.axes2);
plot(dist_geodesica', profundidade_perfil)
xlabel('Distância (metros)');
ylabel('Profundidade (metros)');
title('Perfil Batimétrico');
xlim([0 distancia])
ylim([min(profundidade_perfil) 0])
assignin('base', 'dist_geodesica', dist_geodesica);
assignin('base', 'profundidade_perfil', profundidade_perfil);

end

% --- Executes on button press in previsao_sonar.
function previsao_sonar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to previsao_sonar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of previsao_sonar
axes(handles.axes18)
cla
axes(handles.axes2)
cla
axes(handles.axes3)
cla
axes(handles.axes4)
cla
axes(handles.axes6)
cla
axes(handles.axes5)
cla
axes(handles.axes19)
cla
axes(handles.axes20)
cla

%Torna visível apenas o gráfico de SE
set(handles.axes18,'visible','off')
set(handles.axes2,'visible','off')
set(handles.axes3,'visible','off')
set(handles.axes4,'visible','off')
set(handles.axes5,'visible','off')
set(handles.axes6,'visible','off')
set(handles.axes19,'visible','on')
set(handles.painel_escolha,'visible','off')
set(handles.ficheiro_nome,'visible','off')
set(handles.XBT_tabela,'visible','off')
set(handles.XSV_tabela,'visible','off')
set(handles.axes20,'visible','off')

```

```

set(handles.alcance,'visible','off')
set(handles.distancia,'visible','off')

%Lê as variáveis do gráfico de SE
SE=evalin('base','SE');
SL_final=evalin('base','SL_final');
vertical=evalin('base','vertical');
horizontal=evalin('base','horizontal');
xx_propagacao=evalin('base','xx_propagacao');
zz_propagacao=evalin('base','zz_propagacao');
raios=evalin('base','raios');
t_propagacao=evalin('base','t_propagacao');
profundidade_perfil=evalin('base','profundidade_perfil');
dist_geodesica=evalin('base','dist_geodesica');

axes(handles.axes19)
SE=round(SE);
inf=-30;
SE(SE<-30)=nan;
grad=min(min(SE)):5:SL_final;

contourf(real(xx_propagacao),real(-
zz_propagacao),real(SE),real(grad),'ShowText','on')
colormap(hsv)
axis([0 t_propagacao*1500 min(profundidade_perfil) 0])

xlabel('Distância (m)')
ylabel('Imersão (m)')
%Coloca o alcance sonar
hold on

% Coloca linha a unir os alcances de deteção previstos
%plot(vertical,-horizontal,'o-g')

% Escreve o número de sequência dos raios
%text(vertical,-horizontal,raios')
% Grafica o perfil do fundo
plot(dist_geodesica,profundidade_perfil,'k')

end

% --- Executes on button press in batimetria.
function batimetria_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to batimetria (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of batimetria

%Limpar todos os gráficos
axes(handles.axes3)
cla
axes(handles.axes4)
cla

```

```

axes(handles.axes5)
cla
axes(handles.axes6)
cla
axes(handles.axes2)
cla
axes(handles.axes19)
cla
axes(handles.axes18)
cla

%Tornar apenas o gráfico da batimetria visível:

set(handles.axes18,'visible','on')
set(handles.axes19,'visible','off')
set(handles.axes2,'visible','off')
set(handles.axes3,'visible','off')
set(handles.axes4,'visible','off')
set(handles.axes5,'visible','off')
set(handles.axes20,'visible','off')
set(handles.axes6,'visible','off')
set(handles.painel_escolha,'visible','off')
set(handles.ficheiro_nome,'visible','off')
set(handles.XBT_tabela,'visible','off')
set(handles.XSV_tabela,'visible','off')
set(handles.ficheiro_nome,'visible','off')
set(handles.alcance,'visible','off')
set(handles.distancia,'visible','off')

%Pretende-se apresentar a batimetria dos oceanos para diferentes áreas do
nosso
%planeta, para tal foi utilizada a base de dados da GEBCO 2014:
longitudei=ncread('GEBCO_2014_2D_AtlanticoNorte.nc','lon');
latitudei=ncread('GEBCO_2014_2D_AtlanticoNorte.nc','lat');
elevation=ncread('GEBCO_2014_2D_AtlanticoNorte.nc','elevation');
axes(handles.axes18);
contour(longitudei,latitudei,elevation');
title('Batimetria do Oceano Atlântico Norte');
xlabel('Longitude');
ylabel('Latitude');

end
% -----
% --- Executes on button press in perfis.
function perfis_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to perfis (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of perfis

%Limpa os gráficos :
axes(handles.axes19)
cla
axes(handles.axes2)

```

```

cla
axes(handles.axes3)
cla
axes(handles.axes4)
cla
axes(handles.axes5)
cla
axes(handles.axes6)
cla
axes(handles.axes18)
cla
axes(handles.axes20)
cla

%Torna apenas os gráficos dos perfis visíveis:
set(handles.axes19,'visible','off')
set(handles.axes2,'visible','off')
set(handles.axes18,'visible','off')
set(handles.axes3,'visible','on')
set(handles.axes4,'visible','on')
set(handles.axes5,'visible','on')
set(handles.axes20,'visible','off')
set(handles.axes6,'visible','off')
set(handles.painel_escolha,'visible','off')
set(handles.ficheiro_nome,'visible','off')
set(handles.XBT_tabela,'visible','off')
set(handles.XSV_tabela,'visible','off')
set(handles.alcance,'visible','off')
set(handles.distancia,'visible','off')

%Retirar o valor do ficheiro CTD:
nome_CTD=get(handles.nome_CTD,'String')
%Ler a posição geográfica introduzida pelo utilizador para a representação
%dos perfis:
latitude=get(handles.latitude,'String');
latitude=str2double(latitude);
longitude=get(handles.longitude,'String');
longitude=str2double(longitude);
longitude=longitude;
longituedei=ncread('GEBICO_2014_2D_AtlanticoNorte.nc','lon');
latitudei=ncread('GEBICO_2014_2D_AtlanticoNorte.nc','lat');

%Como as bases de dados são na maioria de 1°, é necessário aproximar a
%posição geográfica introduzido pelo utilizador à posição mais próxima da
%base de dados da WOD 18

latitude_base=floor(latitude)+0.5;
longitude_base=floor(longitude)+0.5;

%Como o valor introduzido pelo utilizador pode ser para a bse de 1/4 há a
%necessidade de verificar qual a diferença entre a posição inserida e as
%existentes nessas bases de dados:

dif_latitude=abs(latitude_base-latitude);
dif_longitude=abs(longitude_base-longitude);

```



```

%Leitura da base de dados
base_dados=evalin('base','base_dados');

switch base_dados
    case 'Anual'
        %Como apenas queremos ler os dados apartir da terceira linha,
        %devemos na função csvread colocar o nome, seguido de dois (para
        %começar a ler após as duas primeiras linhas) e finalmente de um
        %zero:
        wodT=csvread('woa18_decav_t00mn01.csv',2,0);
        wodS=csvread('woa18_decav_s00mn01.csv',2,0);

    case 'Anual 1/4°'
        wodT=csvread('woa18_decav_t00mn04.csv',2,0);
        wodS=csvread('woa18_decav_s00mn04.csv',2,0);

        if dif_latitude==0.125 || dif_latitude==0.375
            latitude_base=latitude;
        else
            latitude_base=latitude+0.125;
        end
        if dif_longitude==0.125 || dif_longitude==0.375
            longitude_base=longitude;
        else
            longitude_base=longitude_base+0.125;
        end

    case 'Janeiro'
        wodT=csvread('woa18_decav_t01mn01.csv',2,0);
        wodS=csvread('woa18_decav_s01mn01.csv',2,0);
    case 'Fevereiro'
        wodT=csvread('woa18_decav_t02mn01.csv',2,0);
        wodS=csvread('woa18_decav_s02mn01.csv',2,0);
    case 'Março'
        wodT=csvread('woa18_decav_t03mn01.csv',2,0);
        wodS=csvread('woa18_decav_s03mn01.csv',2,0);
    case 'Abril'
        wodT=csvread('woa18_decav_t04mn01.csv',2,0);
        wodS=csvread('woa18_decav_s04mn01.csv',2,0);
    case 'Maio'
        wodT=csvread('woa18_decav_t05mn01.csv',2,0);
        wodS=csvread('woa18_decav_s05mn01.csv',2,0);
    case 'Junho'
        wodT=csvread('woa18_decav_t06mn01.csv',2,0);
        wodS=csvread('woa18_decav_s06mn01.csv',2,0);
    case 'Julho'
        wodT=csvread('woa18_decav_t07mn01.csv',2,0);
        wodS=csvread('woa18_decav_s07mn01.csv',2,0);
    case 'Agosto'
        wodT=csvread('woa18_decav_t08mn01.csv',2,0);
        wodS=csvread('woa18_decav_s08mn01.csv',2,0);
    case 'Setembro'
        wodT=csvread('woa18_decav_t09mn01.csv',2,0);
        wodS=csvread('woa18_decav_s09mn01.csv',2,0);

```

```

case 'Outubro'
    wodT=csvread('woa18_decav_t10mn01.csv',2,0);
    wodS=csvread('woa18_decav_s10mn01.csv',2,0);
case 'Novembro'
    wodT=csvread('woa18_decav_t11mn01.csv',2,0);
    wodS=csvread('woa18_decav_s11mn01.csv',2,0);
case 'Dezembro'
    wodT=csvread('woa18_decav_t12mn01.csv',2,0);
    wodS=csvread('woa18_decav_s12mn01.csv',2,0);
case 'Verão'
    wodT=csvread('woa18_decav_t15mn01.csv',2,0);
    wodS=csvread('woa18_decav_s15mn01.csv',2,0);

case 'Verão 1/4°'
    wodT=csvread('woa18_decav_t15mn04.csv',2,0);
    wodS=csvread('woa18_decav_s15mn04.csv',2,0);

%Ajusta o valor introduzido pelo utilizador para a posição mais
%próxima da grelha
if dif_latitude==0.125 || dif_latitude==0.375
    latitude_base=latitude;
else
    latitude_base=latitude+0.125;
end
if dif_longitude==0.125 || dif_longitude==0.375
    longitude_base=longitude;
else
    longitude_base=longitude_base+0.125;
end
case 'Inverno'
    wodT=csvread('woa18_decav_t13mn01.csv',2,0);
    wodS=csvread('woa18_decav_s13mn01.csv',2,0);

case 'Inverno 1/4°'
    wodT=csvread('woa18_decav_t13mn04.csv',2,0);
    wodS=csvread('woa18_decav_s13mn04.csv',2,0);

%Ajusta o valor introduzido pelo utilizador para a posição mais
%próxima da grelha

if dif_latitude==0.125 || dif_latitude==0.375
    latitude_base=latitude;
else
    latitude_base=latitude+0.125;
end
if dif_longitude==0.125 || dif_longitude==0.375
    longitude_base=longitude;
else
    longitude_base=longitude_base+0.125;
end
end

assignin('base','latitude_base',latitude_base)
assignin('base','longitude_base',longitude_base)
%Onde a temperatura estiver 0, colocar NaN para não alterar os reverberacao

```

```

%que se pretende obter:
wodT(wodT==0)=NaN;

%Calcular quais as dimensões da tabela que se obteve:
dimensao_t=size(wodT);
linhas_T=dimensao_t(1);
colunas_T=dimensao_t(2);

%É agora necessário apenas seleccionar os dados da tabela correspondentes à
%posição geográfica da qual se pretende obter os perfis:

%Dados de Latitude e Longitude:
latitude_T=wodT(1:linhas_T,1);
longitude_T=wodT(1:linhas_T,2);

%Falta agora saber qual o índice/linha para o qual a posição geográfica
%corresponde ao do utilizador
indice_T=find((latitude_T==latitude_base)&(longitude_T==longitude_base));

temperatura=wodT(indice_T,3:colunas_T); %Vai ler a linha correspondente ao
%índice da posição encontrada, as colunas começam a ser lidas na terceira
%coluna até à última

Temperatura_final=temperatura.%;%Para ficar um vetor com apenas uma coluna,
%em vez de uma linha

assignin('base','Temperatura_final',Temperatura_final) %Atribuir o valor à
temperatura

%Fazendo o mesmo para a Salinidade:
wodS(wodS==0)=NaN;
dimensao_s=size(wodS);
linhas_S=dimensao_s(1);
colunas_S=dimensao_s(2);
latitude_S=wodS(1:linhas_S,1);
longitude_S=wodS(1:linhas_S,2);
indice_S=find((latitude_S==latitude_base)&(longitude_S==longitude_base));
salinidade=wodS(indice_S,3:colunas_S);
Salinidade_final=salinidade.%;
assignin('base','Salinidade_final',Salinidade_final)

%Imersões
imersoes=[0;5;10;15;20;25;30;35;40;45;50;55;60;65;70;75;80;85;90;...
    95;100;125;150;175;200;225;250;275;300;325;350;375;400;425;...
    450;475;500;550;600;650;700;750;800;850;900;950;1000;1050;...
    1100;1150;1200;1250;1300;1350;1400;1450;1500;1550;1600;1650;...
    1700;1750;1800;1850;1900;1950;2000;2100;2200;2300;2400;2500;...
    2600;2700;2800;2900;3000;3100;3200;3300;3400;3500;3600;3700;...
    3800;3900;4000;4100;4200;4300;4400;4500;4600;4700;4800;4900;...
    5000;5100;5200;5300;5400;5500];

assignin('base','imersoes',imersoes);
h=get(handles.painel_escolha,'SelectedObject');
dados_utilizador=get(h,'Tag')

```

```

%Dados XBT
switch dados_utilizador
case 'XBT_dados'
    %Retirar os dados da tabela XBT
    tabela_XBT=get(handles.XBT_tabela,'Data');
    %Retirar da matriz anterior os valores de temperatura
    temperatura_XBT=tabela_XBT(:,2);
    %Fazer a inversa
    temperatura_XBT=temperatura_XBT';
    %Retirar os valores de imersão
    imersoes_XBT=tabela_XBT(:,1);
    imersoes_XBT=imersoes_XBT';
    %Guardar os dados de temperatura
    assignin('base','temperatura_XBT',temperatura_XBT)
    %Substituir os valores anteriores na matriz de temperatura final

Temperatura_final(1:length(temperatura_XBT))=temperatura_XBT(1:length(temperatura_XBT));
    %Substituir os valores de imersão
    imersoes(1:length(imersoes_XBT))=imersoes_XBT(1:length(imersoes_XBT));

%Ficheiro CTD:

case 'CSV_dados'
    %Leitura dos dados do CTD a partir do nome inserido pelo utilizador
    CTD=csvread(nome_CTD,0,0);

    %Colocação dos dados em vetores:
    imersoes_CTD=CTD(:,1)';
    temperatura_CTD=CTD(:,3)';
    salinidade_CTD=CTD(:,5)';

    %Cálculo da imersão máxima do vetor imersões CTD
    imersao_max_CTD=max(imersoes_CTD);

    for i=1:length(imersoes)
    if imersoes(i)<=imersao_max_CTD
        imersao_padrao(i)=imersoes(i);
    else
    end
    end

    %Fazer o spline dos dados anteriores
    T_CTD=spline(imersoes_CTD,temperatura_CTD,imersao_padrao);
    S_CTD=spline(imersoes_CTD,salinidade_CTD,imersao_padrao);
    % Usa valores do CTD:
    Temperatura_final(1:length(T_CTD))=T_CTD(1:length(T_CTD));
    Salinidade_final(1:length(S_CTD))=S_CTD(1:length(S_CTD));
    imersoes(1:length(imersao_padrao))=imersao_padrao ...
        (1:length(imersao_padrao));

    % Usa o ficheiro BT
    case 'BT_dados'
    BT=dlmread(nome_CTD, ' ',0,0); % Carrega o ficheiro para matriz 2D
    imersao_BT=BT(:,1); % Guarda imersões em vetor coluna

```

```

    temperatura_BT=BT(:,2); % Guarda as temperaturas em vetor coluna
    % Máxima imersão dos dados do BT
    BT_maximersao=max(imersao_BT);
    % Prepara vetor com as imersões da climatologia até à máxima imersão
    % do BT
    for i=1:length(imersoes)
        if imersoes(i)<=BT_maximersao
            padrao_BT(i)=imersoes(i);
        else
            end
        end

    Temperatura_BT=spline(imersao_BT,temperatura_BT,padrao_BT);
    % Usa valores do BT:

Temperatura_final(1:length(Temperatura_BT))=Temperatura_BT(1:length(Temperatura_BT));
    imersoes(1:length(padrao_BT))=padrao_BT ...
        (1:length(padrao_BT));
    case 'climatologia'
    case 'XSV_dados'
end

z=imersoes;
lat=latitude_base;

elevation=ncread('GEBCO_2014_2D_AtlanticoNorte.nc','elevation');
max_profundidade=min(min(elevation));
assignin('base','max_profundidade',max_profundidade);

%Cálculo das funções TEOS-2010
pressao=gs_w_p_from_z(-z,lat);
pressao_final=pressao(1:length(Temperatura_final));
S_A=gs_w_SA_from_SP(Salinidade_final,pressao_final,longitude_base,latitude_base);
T_C=gs_w_CT_from_t(S_A,Temperatura_final,pressao_final);
rho=gs_w_rho(S_A,T_C,pressao_final);
velocidade_som=gs_w_sound_speed(S_A,T_C,pressao_final);

incremento_profundidade=0:1:abs(max_profundidade);
velocidade_som_final=spline(pressao_final,velocidade_som,incremento_profundidade);
media_som=mean(velocidade_som_final);
assignin('base','media_som',media_som)

switch dados_utilizador
    case 'XSV_dados'
        tabela_XSV=get(handles.XSV_tabela,'Data');
        som_XSV=tabela_XSV(:,2);
        som_XSV=som_XSV';
        imersoes_XSV=tabela_XSV(:,1);
        imersoes_XSV=imersoes_XSV';
        velocidade_som_final(1:length(som_XSV))=som_XSV(1:length(som_XSV));

```

```

end
inc_long=(max(longitudei)-min(longitudei))/(length(longitudei)-1);
inc_lat=(max(latitudei)-min(latitudei))/(length(latitudei)-1);
ind_long=round((longitude-min(longitudei))/inc_long+1);
ind_lat=round((latitude-min(latitudei))/inc_lat+1);
% Obtém e escreve a profundidade na posição
profundidade=-elevation(ind_long,ind_lat)
assignin('base','profundidade',profundidade);

assignin('base','velocidade_som',velocidade_som);
assignin('base','incremento_profundidade',incremento_profundidade);
assignin('base','velocidade_som_final',velocidade_som_final);

%Faz o plotting dos perfis
axes(handles.axes3)
h=plot(T_C,-pressao_final);
set(h,'Tag','temperatura')
xlabel('Temperatura Conservativa (°C)')
ylabel('Pressão (dbar)')
xlim([min(T_C) max(T_C)])

axes(handles.axes4)
h=plot(S_A,-pressao_final);
set(h,'Tag','salinidade')
xlabel('Salinidade Absoluta(g/kg)')
ylabel('Pressão (dbar)')
xlim([min(S_A) max(S_A)])

axes(handles.axes5)
h=plot(velocidade_som,-pressao_final,'r');
set(h,'Tag','vel')
xlabel('Velocidade do som (m/s)')
ylabel('Pressão (dbar)')
xlim([min(velocidade_som) max(velocidade_som)])
end

% --- Executes on button press in sonar.
function sonar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to sonar (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of sonar

%Limpar os gráficos:

end

% --- Executes on button press in raytrace.
function raytrace_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Limpar os gráficos:
axes(handles.axes3)

```

```

cla
axes(handles.axes4)
cla
axes(handles.axes5)
cla
axes(handles.axes19)
cla
axes(handles.axes2)
cla
axes(handles.axes6)
cla
axes(handles.axes18)
cla
axes(handles.axes20)
cla
%Definir quais os gráficos que devem ficar visíveis:
set(handles.axes19,'visible','on')
set(handles.axes18,'visible','off')
set(handles.axes2,'visible','off')
set(handles.axes3,'visible','off')
set(handles.axes4,'visible','off')
set(handles.axes5,'visible','off')
set(handles.axes6,'visible','on')
set(handles.painel_escolha,'visible','off')
set(handles.XBT_tabela,'visible','off')
set(handles.XSV_tabela,'visible','off')
set(handles.alcance,'visible','on')
set(handles.distancia,'visible','on')

%Carregar os valores das variáveis que são necessárias:
raio_inferior=evalin('base','raio_inferior');
raio_superior=evalin('base','raio_superior');
imersao_transdutor=evalin('base','imersao_transdutor');
max_profundidade=evalin('base','max_profundidade');
profundidade_perfil=evalin('base','profundidade_perfil');
dist_geodesica=evalin('base','dist_geodesica');
imersoes=evalin('base','imersoes');
velocidade_som=evalin('base','velocidade_som');
velocidade_som_final=evalin('base','velocidade_som_final');
Temperatura_final=evalin('base','Temperatura_final');
Salinidade_final=evalin('base','Salinidade_final');
frequencia=evalin('base','frequencia');
pH=evalin('base','pH');
latitude_base=evalin('base','latitude_base');
longitude_base=evalin('base','longitude_base');
perdas_fundo=evalin('base','perdas_fundo');
frequencia=evalin('base','frequencia');
SS=evalin('base','SS');
indice_SL=evalin('base','indice_SL');
sonar_func=evalin('base','sonar_func');
vaga_em_pes=evalin('base','vaga_em_pes');
TL_fator=evalin('base','TL_fator');
escolha=evalin('base','escolha');
media_som=evalin('base','media_som');

```

```

SL_final=evalin('base','SL_final');
BS_fundo=evalin('base','BS_fundo');
densidade_navegacao=evalin('base','densidade_navegacao');
precipitacao=evalin('base','precipitacao');
largura_de_banda=evalin('base','largura_de_banda');
velocidade_propria=evalin('base','velocidade_propria');
DT=evalin('base','DT')
TS=evalin('base','TS')

%Retirar os NaN das matrizes com perfis de T, S e c:
Temperatura_final_z=Temperatura_final(isfinite(Temperatura_final));
dimensao_t=length(Temperatura_final_z)
media_T=mean(Temperatura_final_z);
Salinidade_final_z=Salinidade_final(isfinite(Salinidade_final));
media_S=mean(Salinidade_final_z);
dimensao_S=length(Salinidade_final);
vel_som=velocidade_som(isfinite(velocidade_som));

imersoes_z=imersoes(isfinite(velocidade_som));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcular o traçado dos raios, através da utilização da função Raytrace,
% tendo em conta a batimetria de fundo:

inc=1;

% Definição dos eixos do gráfico 6:
axes(handles.axes6)

if sonar_func==1
    t_propagacao=20; % sonar ativo
else
    t_propagacao=46; % sonar passivo
end

assignin('base','t_propagacao',t_propagacao);
% Cálculo de quantos raios:
numero_raios=raio_inferior-raio_superior+1;

%Cálculo das coordenadas da propagação para cada um dos raios:
for i=1:numero_raios

    %Criar vetor de profundidades para fazer a interpolação dos valores de
    %velocidade do som:
    zz=min(imersoes_z):inc:5500;

    %Velocidades do som interpoladas:
    cc=interp1(imersoes_z,vel_som,zz,'linear','extrap');

    %o índice dos raios:
    i_raio=raio_superior+i-1;
    % Remover o i_raio=0 para contorna problema com o raio zero no GUI
    if i_raio==0
        i_raio=-0.55;
    end
end

```



```

else
end

% Chama a função raytrace para o novo raio
[x, z, t, d] = raytrace(0,imersao_transdutor,i_raio,t_propagacao,zz,cc,0);

%Conversão para variável numérica e depois apenas considera a parte real:
x=real(cell2mat(x));
z=real(cell2mat(z));

%Interação com o fundo da batimetria:
perfil_batimetria=spline(dist_geodesica,-profundidade_perfil,x);

indice_interacao=find(z'>=perfil_batimetria);
if isfinite(indice_interacao)
    interacao_1=indice_interacao(1);
    profundidade_interacao=z(interacao_1);
    coordenada_horizontal=x(interacao_1);

    zz=min(imersoes_z):inc:profundidade_interacao;

    %cc=spline(imersoes_z,vel_som,zz);
    cc=interp1(imersoes_z,vel_som,zz,'linear','extrap');

    %Função Raytrace:
    [x, z, ~, d] = raytrace(0,imersao_transdutor,i_raio,t_propagacao,zz,cc,0);

    %Conversão para variável numérica e depois apenas considera a parte real:
    x=real(cell2mat(x));
    z=real(cell2mat(z));

else
end

hold on
plot(x,-z)

%Definir os limites dos eixos
axis([0 t_propagacao*1500 min(profundidade_perfil) 0])
xlabel('Distância (m)')
ylabel('Profundidade (m)')

% Guardar as coordenadas das posições pelo qual os raios irão passar:
xx_propagacao(i,1:length(x))=x;
zz_propagacao(i,1:length(z))=z;
end

% Grafica o perfil do fundo:
plot(dist_geodesica,profundidade_perfil,'k')

assignin('base','xx_propagacao',xx_propagacao);
assignin('base','zz_propagacao',zz_propagacao);

%Cálculo da distância total percorrida:
%Determinar o número de linhas e colunas:

```

```

numero_linhasxx=size(xx_propagacao,1);
assignin('base','numero_linhasxx',numero_linhasxx)
numero_colunasxx=size(xx_propagacao,2);
assignin('base','numero_colunasxx',numero_colunasxx)

%Substituição dos zeros da matriz de distâncias de propagação, para obter
%valores correctos:

%Remover os zeros da matriz, excepto da primeira coluna que corresponde à
%saída do transdutor para que os valores obtidos sejam coerentes:
for i=1:numero_linhasxx
    for j=1:numero_colunasxx
        if xx_propagacao(i,j)==0 && j>2 %Segunda coluna
            xx_propagacao(i,j)=NaN;
            zz_propagacao(i,j)=NaN;
        else
            end
    end
end

%Determinação da distância
distancia_total=NaN(numero_linhasxx,numero_colunasxx);
%Criar a matriz distância total com o número de colunas e linhas das
%coordenadas de propagação com NaN:
distancia_total=NaN(numero_linhasxx,numero_colunasxx);
for i=1:numero_linhasxx
    distancias=0;
    %Faz corresponder à primeira coluna de cada raio o valor 0:
    distancia_total(i,1)=0;
    for k=2:numero_colunasxx
        distancia_total(i,k)=distancias+(sqrt((xx_propagacao(i,k)-...
            xx_propagacao(i,k-1))^2+(zz_propagacao(i,k)...
            -zz_propagacao(i,k-1))^2));

        %Valor total da distância para cada raio:
        distancias=distancia_total(i,k);
    end
end

assignin('base','distancias',distancias)

%Cálculo dos coeficientes de absorção:
%Passar os dados conhecidos das imersões para toda a coluna de água:

%Valores de profundidade:
z_absorcao=0:max(max(zz_propagacao));
media_imersao=mean(z_absorcao);

%Valores de temperatura:
temperatura_absorcao=spline(imersoes_z,Temperatura_final_z,z_absorcao);
temperatura_absorcao=spline(imersoes_z,Temperatura_final_z(1:length(imersoes_z
)),z_absorcao);

```

```

media_temp=mean(temperatura_absorcao);

%Valores de salinidade
salinidade_absorcao=spline(imersoes_z,Salinidade_final_z(1:length(imersoes_z)),z_absorcao);
media_sal=mean(salinidade_absorcao);

%Chama a função da absorção do som para o cálculo da mesma:
[absorcao_final]=calculo_absorcao(frequencia,media_temp,media_sal,media_imersao,pH);

%Cálculo da profundidade para a posição escolhida:
latitude_raytrace=get(handles.latitude,'String');
latitude_raytrace=str2double(latitude_raytrace);
longitude_raytrace=get(handles.longitude,'String');
longitude_raytrace=str2double(longitude_raytrace);
elevation_basededados=ncread('GEBCO_2014_2D_AtlanticoNorte.nc','elevation');
longitudei=ncread('GEBCO_2014_2D_AtlanticoNorte.nc','lon');
latitudei=ncread('GEBCO_2014_2D_AtlanticoNorte.nc','lat');

% Determinação dos incrementos para a base de dados
incremento_longitude=(max(longitudei)-min(longitudei))/(length(longitudei)-1);
incremento_latitude=(max(latitudei)-min(latitudei))/(length(latitudei)-1);

%Determinação dos índices da posição selecionada pelo utilizador
indice_longitude=round((longitude_raytrace-min(longitudei))/incremento_longitude+1);
indice_latitude=round((latitude_raytrace-min(latitudei))/incremento_latitude+1);

profundidade=elevation_basededados(indice_longitude,indice_latitude);
disp('Profundidade:')
disp(profundidade)
%Criar um ciclo para cada raio, que vai verificar se existe interação, caso
%ocorra determina as coordenadas e número de interações:
perdas_de_superficie=zeros(numero_linhasxx,numero_colunasxx);
distancia_interacao_superficie=zeros(numero_linhasxx,25);
area_superficie=zeros(numero_linhasxx,25);% Prelocates
TS_superficie=zeros(numero_linhasxx,25);% Prelocates
TS_superficie_area=zeros(numero_linhasxx,25);% Prelocates
distancia_superf_horizontal=NaN(numero_linhasxx,25);%
Prelocates
BS_superficie=zeros(numero_linhasxx,25);
% Prelocates
for i=1:numero_linhasxx

% Calculo da coluna correspondente à interação:
interacao_fundo=find(zz_propagacao(i,:)==profundidade);

% Determina a distância de cada interação do raio i com o fundo
distancia_interacao=xx_propagacao(i,interacao_fundo);

```

```

% Determina o número de interações de cada raio com o fundo
    numero_de_interacoes=numel(distancia_interacao);87
perdas_de_fundo=zeros(numero_linhasxx,numero_colunasxx);
% Cálculo das perdas
if numero_de_interacoes>=1

    for l=2:numero_de_interacoes
        perdas_de_fundo(i,interacao_fundo(l-1):interacao_fundo(l))=(1-
1)*perdas_fundo;
    end

% Perdas desde a última interação até à dimensão total das coordenadas
%horizontais da matriz propagação:
perdas_de_fundo(i,interacao_fundo(numero_de_interacoes):numero_colunasxx)=...
    numero_de_interacoes*perdas_fundo;
assignin('base','perda_fundo',perdas_de_fundo)

else
end
end

%Cálculo das perdas de fundo:
perdas_superficie=SS*sqrt(frequencia);

%Cálculo das perdas por interação:
for i=1:numero_linhasxx
% Determina índices das colunas de dz, onde cada raio i atinge a superfície
    interacao_superficie=find(zz_propagacao(i,:)==0);
% Determina qual a distância das interações de cada raio i com a superfície
    distancia_interacao_superficie=xx_propagacao(i,interacao_superficie);
% Determina o número de interações de cada raio i com a superfície
    numero_interacoes_superficie=length(distancia_interacao_superficie);

if numero_interacoes_superficie>=1

    for j=2:numero_interacoes_superficie
        perdas_de_superficie(i,interacao_superficie(j-1):...
            interacao_superficie(j))=(j-1)*perdas_superficie;
    end

% Perdas desde a última interação até à dimensão total das coordenadas
%horizontais da matriz propagação:
perdas_de_superficie(i,interacao_superficie(numero_interacoes_superficie)...
    :numero_colunasxx)=numero_interacoes_superficie*perdas_superficie;

end

end
assignin('base','perdas_de_superficie',perdas_de_superficie)

%Caso o valor de SL final seja diretamente introduzido, o programa não faz
%cálculos.

```

```

if indice_SL==1
    DI_tx=evalin('base','DI_tx');
    DI_rx=evalin('base','DI_rx');
else
    P_SL=evalin('base','P_SL');
    h_SL=evalin('base','h_SL');
    d_SL=evalin('base','d_SL');

    %Fórmulas de Hodge página 64, equação 4.6:
    DI_tx=10*log10(5*h_SL*d_SL*frequencia^2);
    SL_final=10*log10(P_SL)+170.8+DI_tx;
    SL_final=round(SL_final);
    DI_tx=round(DI_tx);
    DI_rx=DI_tx;

    %Guardar os valores obtidos dos cálculos anteriores

    assignin('base','SL_final',SL_final)

    %Introduzir o valor de DI_tx e SL_final caso tenham sido efectuados os
    %cálculos:
    set(handles.DI_tx,'String',num2str(DI_tx))

end

%Cálculo das perdas de absorção totais para cálculo de TL:
for i=1:numero_linhasxx
    perdas_absorcao(i,:)=absorcao_final.*distancia_total(i,:);
end

incremento_xx=0:1:floor(t_propagacao*1500);
%Leitura do tipo de propagação que pode existir (separação vertical de
%raios ou esférico-cilindrica:

%Para Separação Vertical de Raios:
if escolha==2

for i=1:numero_linhasxx

    % Eliminar os valores repetidos
    colunas_eliminar=[];
    for j=1:size(xx_propagacao(i,:),2)
        indice_repetidos=find(xx_propagacao(i,:)==xx_propagacao(i,j));
        % Caso exista valores repetidos
        if numel(indice_repetidos)>1
            % Guarda índices de valores repetidos
            colunas_eliminar=[colunas_eliminar indice_repetidos(2:end)];
        end
    end
    end
    x_propagacao=xx_propagacao(i,:);
    x_propagacao(colunas_eliminar)=[];
    z_propagacao=zz_propagacao(i,:);
    z_propagacao(colunas_eliminar)=[];

```

```

    %Cálculo das coordenadas verticais dos raios:
    incremento_zz(i,:)=abs(spline(x_propagacao,z_propagacao,incremento_xx));

    %Eliminar as coordenadas verticais superiores à profundidade
    indice_NaN=find(incremento_zz(i,:)>abs(max(profundidade_perfil)));
    incremento_zz(i,indice_NaN)=NaN;
end
assignin('base','incremento_zz',incremento_zz)
assignin('base','incremento_xx',incremento_xx)

%Cálculo das diferenças verticais entre raios a incrementos de intervalos
%horizontais de 1 m

for i=1:numero_linhasxx-1
    delta_z(i,:)=abs(incremento_zz(i+1,:)-incremento_zz(i,:));
end

%Para o caso da última linha
delta_z(numero_linhasxx,:)=delta_z(numero_linhasxx-1,:);

%Cálculo da velocidade do som junto ao transdutor:
velocidade_transdutor=velocidade_som_final(imersao_transdutor);
assignin('base','velocidade_transdutor',velocidade_transdutor)

%Calcula as velocidades do som em função de delta_z
incremento_velocidade=zeros(numero_linhasxx,length(incremento_xx));
velocidade_projecao=zeros(numero_linhasxx,length(incremento_xx));

%Fazendo os cálculos
for i=1:numero_linhasxx

    for j=1:length(incremento_xx)
        if ~isnan(incremento_zz(i,j))
            %Como os incrementos tem que ser inteiros, utiliza-se o cel para
            %arredondar os valores de matriz para o inteiro mais próximo

            incremento_velocidade(i,j)=velocidade_som_final(ceil(incremento_zz(i,j)));

            %Verificar qual a razão entre a velocidade à saída do transdutor e
            para as
            %diversas posições tendo em conta os incrementos

            velocidade_projecao(i,j)=incremento_velocidade(i,j)/velocidade_transdutor;
        else
            %Nos casos em que dz_step for NaN, c_step e rac_c_step ficam NaN
            incremento_velocidade(i,j)=NaN;
            velocidade_projecao(i,j)=NaN;
        end
    end
end

end

%Fazendo interpolação dos dados obtidos através do Spline
for i=1:numero_linhasxx
    distancia_vertical_raios(i,:)=abs(spline(incremento_xx(:),delta_z(i,:),...
        xx_propagacao(i,:)));
end

```

```

        razao_velocidade_som(i,:)=abs(spline(incremento_xx(:),...
        velocidade_projecao(i,:),xx_propagacao(i,:)));
end

TL=zeros(numero_linhasxx,numero_colunasxx);

for i=1:numero_linhasxx
    %Cálculo de perdas de transmissão por dispersão vertical dos raios,
    %TL1, com perdas no fundo e na superfície
    TL(i,:)=10*log10(xx_propagacao(i,:).*distancia_vertical_raios(i,:).*razao_velo
    cidade_som(i,:)/...
    pi/180)+absorcao_final*distancia_total(i,:)+perdas_de_superficie(i,:)+perdas_d
    e_fundo(i,:);
end
assignin('base','TL',TL)

%TL por dispersão esférico-cilíndrica

else
    %Inicializa valores, vetores e matrizes que serão utilizados no cálculo da

    index=zeros(numero_linhasxx);
    alcance_exterior=zeros(numero_linhasxx);
    TL=zeros(numero_linhasxx,numero_colunasxx);

    %Fazendo os cálculos
    for i=1:numero_linhasxx
        TL(i,:)=10*TL_fator*log10(xx_propagacao(i,:))+absorcao_final*...
        distancia_total(i,:)+perdas_de_superficie(i,:)+...
        perdas_de_fundo(i,:);
    end
    assignin('base','TL',TL)
end

for i=1:numero_linhasxx
    %Cálculo do nível do sinal com a distância, sinal_x
    sinal_x(i,:)=SL_final-(TL(i,:));
    assignin('base','sinal_x',sinal_x)
    %Deteta onde o nível do sinal é >= 0
    indice_sonar=find(sinal_x(i,:) >= 0);
    assignin('base','indice',indice_sonar)
    %Encontra o índice, onde o sinal é mínimo positivo
    index(i)=max(indice_sonar);
    assignin('base','index',index)
    %Estimativa de alcance de extinção, Alcance_ext, (m)
    alcance_exterior(i)=xx_propagacao(i,index(i));

    alcance_medio=mean(alcance_exterior);
end
profundidade=abs(profundidade);
if profundidade<=1000
    profundidade=profundidade-100;
else
    profundidade=profundidade;
end

```

```

disp(profundidade)
distanciax_fundo=zeros(numero_linhasxx,25);           % Prelocates
TS_fundo=zeros(numero_linhasxx,25);                   % Prelocates
TS_fundo_area=zeros(numero_linhasxx,25);              % Prelocates
distancia_raio_fundo=NaN(numero_linhasxx,25);
distancia_raio_matriz=zeros(numero_linhasxx,25);
distancia_fundo_matriz=zeros(numero_linhasxx,25);

%Cálculo da reverberação de fundo
for i=1:numero_linhasxx

    %Necessário saber qual o índice no qual há interacao com o fundo
    indice_fundo=find(zz_propagacao(i,:)==abs(profundidade));

    %Cálculo da coordenada horizontal de interação com o fundo:
    distanciax_fundo=xx_propagacao(i,indice_fundo);

    %Cálculo da distancias do raio:
    distancia_raio_fundo=distancia_total(i,indice_fundo);

    %Número de interações
    interacoes_fundo=numel(distanciax_fundo);

    %Colocando os dados numa matriz
    distancia_raio_matriz(i,1:length(distancia_raio_fundo))=...
    distancia_raio_fundo(1:length(distancia_raio_fundo));

    distancia_horizontal_matriz(i,1:length(distanciax_fundo))=distanciax_fundo(1:..
    ..
    length(distanciax_fundo));

    if interacoes_fundo>=1
        for j=1:interacoes_fundo-1
            % Calcula a target strength para uma área de 1 metro quadrado
            TS_fundo(i,j)=BS_fundo+log10(1);
        end
        %Para a última interação:
        TS_fundo(i,interacoes_fundo)=BS_fundo+log10(1);
    else
        end
end

% ESubstituir os zeros por NaN:
TS_fundo(TS_fundo==0)=NaN;
disp(TS_fundo)
distancia_horizontal_matriz(distancia_horizontal_matriz==0)=NaN;
distancia_raio_matriz(distancia_raio_matriz==0)=NaN;

%Cálculo das áreas de interação com o fundo
area_fundo=NaN(numero_linhasxx,25);

%Para saber a distância entre raios:

```



```

for i=1:numero_linhasxx-1
    for j=1:interacoes_fundo
        area_fundo(i,j)=((abs(distancia_horizontal_matriz(i+1,j)-...
            distancia_horizontal_matriz(i,j)))/2)^2*pi;
        %Considera-se que a última deve ficar idêntica à penúltima:
        area_fundo(i+1,j)=area_fundo(i,j);
    end
end

for i=1:1:numero_linhasxx-1
    for j=1:1:interacoes_fundo
        if isnan(area_fundo(i+1,j)) && isfinite(area_fundo(i,j))
            area_fundo(i+1,j)=area_fundo(i,j);
        else
            end
        end
    end
end

%Substituindo o valor das áreas:
TS_fundo_area=TS_fundo+10*log10(area_fundo);
assignin('base','TS_fundo_area',TS_fundo_area);
assignin('base','area_fundo',area_fundo);
assignin('base','distancia_horizontal_matriz',distancia_horizontal_matriz);
assignin('base','distancia_raio_matriz',distancia_raio_matriz);

%Resolução da reverberação de fundo, apartir do SL, TS e TL:
%Considerou-se uma transmissão esférico-cilíndrica com betaa igual à
%propagação do sinal acústico do sonar:
for i=1:numero_linhasxx

    %Necessário saber qual o índice no qual há interacao com o fundo
    indice_fundo=find(zz_propagacao(i,:)==abs(profundidade));
    for j=1:length(indice_fundo)
        RL_fundo(i,j)=SL_final+TS_fundo_area(i, j)-2*TL(i,indice_fundo(j));
    end
end

for i=1:numero_linhasxx
    if interacoes_fundo==0
        RL_fundo(i,:)=0
    end
end

%Eliminar as reverberações negativas:
dimensao_RL=size(RL_fundo);

for k=1:dimensao_RL(1,1)
    for d=1:dimensao_RL(1,2)
        if RL_fundo(k,d)<0
            RL_fundo(k,d)=0;
        else
            %Caso não haja mantém-se os mesmos valores
        end
    end
end
end

```

```

% Para não interferir nos valores substitui-se os NaN por zeros
RL_fundo(isnan(RL_fundo))==0;
assignin('base','RL_fundo',RL_fundo)

% Agora é preciso saber qual o valor da reverberação nas coordenadas obtidas
% pelo Raytrace assim:

RL_fundo_raytrace(numero_linhasxx,numero_colunasxx)=0;
for i=1:numero_linhasxx
if interacoes_fundo==1
    RL_fundo_raytrace(i,1:indice_fundo(1))=0;
    RL_fundo_raytrace(i,indice_fundo(1):numero_colunasxx)=RL_fundo(i,1);
else if interacoes_fundo==2
    RL_fundo_raytrace(i,1:indice_fundo(1))=0;
    RL_fundo_raytrace(i,indice_fundo(1):indice_fundo(2))=RL_fundo(1);
    RL_fundo_raytrace(i,indice_fundo(2):numero_colunasxx)=RL_fundo(2);
else if interacoes_fundo>2
    RL_fundo_raytrace(i,1:indice_fundo(1))=0;
    for k=2:interacoes_fundo
        RL_fundo_raytrace(i,indice_fundo(k-
1):indice_fundo(k))=RL_fundo(k-1);
    end

RL_fundo_raytrace(i,indice_fundo(interacoes_fundo):numero_colunasxx)...
    =RL_fundo(interacoes_fundo);

else
end

end
end
end
RL_1=find(~isnan(RL_fundo_raytrace),1);
declive=0
for k=2:numero_colunasxx
%Encontra onde ocorre mudança do valor de RL
diferenca=RL_fundo_raytrace(k-1)-RL_fundo_raytrace(k);
if diferenca>0
    declive=declive+1;
%Se a mudança ocorre entre a 1ª e a 2ª interação, então é calculado um
%declive m, entre o primeiro valor de reverberação e o 2º que lhe é
%diferente.
    if declive==1
        m=-(RL_fundo_raytrace(RL_1)-RL_fundo_raytrace(k))/(k-RL_1);
        for j=RL_1:k-1
            RL_fundo_raytrace(j)=RL_fundo_raytrace(RL_1)+m*(j-RL_1);
        end
        anterior=k;
    end
%Continua a calcular os declives e a atenuar os valores entre interações.
    if declive>1
        m=-(RL_fundo_raytrace(anterior)-RL_fundo_raytrace(k))/(k-
anterior);
        for j=anterior:k-1
            RL_fundo_raytrace(j)=RL_fundo_raytrace(anterior)+m*(j-
anterior+1);
        end
    end
end

```

```

        anterior=k;
    end
end
end
RL_fundo(RL_fundo<0)=0;
RL_fundo(isnan(RL_fundo))==0;
RL_fundo_raytrace(RL_fundo_raytrace==0)=NaN;
assignin('base','RL_fundo_raytrace',RL_fundo_raytrace);

%Reverberações de Volume:

%Distâncias horizontais:
distancia_volume=xx_propagacao(round(numero_linhasxx/2),1:numero_colunasxx);

% Duração do impulso em segundos:
duracao_impulso=0.5;

% BS de volume
BS_volume=-80;

% Cálculo do ângulo sólido:
angulo_solido=2*pi*(1-cos(pi/360));

% Cálculo do volume para reverberações recebidas, função da distância
volume=1500*duracao_impulso/2*angulo_solido*(distancia_volume).^2;

% Cálculo do vetor RL:
RL_volume_raytrace=SL_final-40*log10(distancia_volume)-2*absorcao_final*...
    distancia_volume+BS_volume+10*log10(volume);

%Eliminar as reverberações negativas atribuindo-lhes o valor 0:

for i=1:numel(distancia_volume)
    if RL_volume_raytrace(i)<0
        RL_volume_raytrace(i)=0;
    else
        end
end

%Eliminar os NaN:
RL_volume_raytrace(isnan(RL_volume_raytrace))==0;

% Matriz duas dimensoes das reverberações de volume:
RL_volume_final=NaN(numero_linhasxx,numero_colunasxx);

for i=1:numero_linhasxx
    for j=1:numero_colunasxx
        RL_volume_final(i,j)=RL_volume_raytrace(1,j);
    end
    RL_volume_final(i,1)=RL_volume_raytrace(1,2);
end
assignin('base','RL_volume',RL_volume_final)

```

```

%Cálculo reverberações de superfície:
distancia_supraio_matriz=zeros(numero_linhasxx,25);           % Prelocates
TS_superficie=zeros(numero_linhasxx,25);                     % Prelocates
TS_superficie_area=zeros(numero_linhasxx,25);                 % Prelocates
distancia_superf_raio=NaN(numero_linhasxx,25);
distancia_suphorizontal_matriz=zeros(numero_linhasxx,25);

for i=1:numero_linhasxx

    % Índices das interações com a superfície
    indice_superficie=find(zz_propagacao(i,:)==0);
    % Calcula as distâncias das interações com a superfície, quer horizontal
    % quer do próprio raio:
    distancia_superf_raio=distancia_total(i,indice_superficie);
    distancia_superf_horizontal=xx_propagacao(i,indice_superficie);

    %Número de interações com a superfície:
    interacoes_superficie=length(indice_superficie);
    grazing_angle=zeros(numero_linhasxx,25);
    % Calcula ângulo grazing e BS das várias interações com a superfície:

    if interacoes_superficie==0
        grazing_angle=0;
        BS_superficie=0;
    else
        for k=1:25

            % Cálculo do grazing angle:
            grazing_angle(i,k)=(atan2(abs(zz_propagacao(k)-
zz_propagacao((k))),...
            abs(xx_propagacao((k))-xx_propagacao((k))))*180/pi+0.1;
            % Hodges (2010), p. 151

BS_superficie(i,k)=9.9*log10(frequencia*vaga_em_pes*sind(grazing_angle(i,k)))-
45.3;

        end

    end

    % Agora é necessário guardar os dados obtidos numa matriz, para serem
    % depois feitos cálculos com os dados de todos os raios:

    distancia_supraio_matriz(i,1:length(distancia_superf_raio))=distancia_superf_r
aio(:);

    distancia_suphorizontal_matriz(i,1:length(distancia_superf_horizontal))=distan
cia_superf_horizontal(:);           % na horizontal

    if interacoes_superficie>0
        for j=1:25
            %TS de superfície:
            TS_superficie(i,j)=BS_superficie(i,j)+10*log10(1);
        end
    end

```

```

        else
            TS_superficie(i,j)=0;
        end
    end
end

distancia_supraio_matriz(distancia_supraio_matriz==0)=NaN;

assignin('base','TS_superficie',TS_superficie);
assignin('base','BS_superficie',BS_superficie);

%Criar a matriz para as áreas:
if interacoes_superficie>0
    area_superficie=zeros(numero_linhasxx,25);
    distancia_suphorizontal_matriz=zeros(numero_linhasxx,25);
    else
        area_superficie=0;
    end
if interacoes_superficie>0
    for i=1:numero_linhasxx-1
        for j=1:25
            area_superficie(i,j)=(abs(distancia_suphorizontal_matriz(i+1,j)-
...
            distancia_suphorizontal_matriz(i,j))/2)^2*pi;
            % O último tem de ficar igual ao penúltimo
            area_superficie(i+1,j)=area_superficie(i,j);
        end
    end
else
end

if interacoes_superficie>0
    %Mete o numero de interações igual ao número de áreas
    for i=1:numero_linhasxx-1
        for j=1:25
            if isnan(area_superficie(i+1,j)) && isfinite(area_superficie(i,j))
                area_superficie(i+1,j)=area_superficie(i,j);
            else
                end
            end
        end
    end
else
end

disp(area_superficie)
if interacoes_superficie>0
    %Alterar o TS tendo em conta as áreas obtidas através dos cálculos:
    TS_superficie_area=TS_superficie
    else
    end

disp(TS_superficie_area)
size(distancia_supraio_matriz)

```

```

for i=1:numero_linhasxx

    %Necessário saber qual o indice no qual há interacao com o fundo
    indice_superficie=find(zz_propagacao(i,:)==abs(0));
    interacoes_superficie=numel(indice_superficie)
    for j=1:length(indice_superficie)
        RL_superficie(i,j)=SL_final+TS_superficie_area(i, j)-
        2*TL(i,indice_superficie(j));
    end
end

%Eliminar as reverberações negativas:
dimensao_RL=size(RL_superficie);

for k=1:dimensao_RL(1,1)
    for d=1:dimensao_RL(1,2)
        if RL_superficie(k,d)<0
            RL_superficie(k,d)=0;
        else
            %Caso não haja mantém-se os mesmos valores
        end
    end
end

% Para não interferir nos valores substitui-se os NaN por zeros
RL_superficie(isnan(RL_superficie))=0;
assignin('base','RL_superficie',RL_superficie)

%Agora é preciso saber qual o valor da reverberação nas coordenadas obtidas
%pelo Raytrace assim:

RL_superficie_raytrace(numero_linhasxx,numero_colunasxx)=0;
for i=1:numero_linhasxx
    if interacoes_superficie==1
        RL_superficie_raytrace(i,1:indice_superficie(1))=0;

    RL_superficie_raytrace(i,indice_superficie(1):numero_colunasxx)=RL_superficie
    (i,1);
        else if interacoes_superficie==2
            RL_superficie_raytrace(i,1:indice_fundo(1))=0;

    RL_superficie_raytrace(i,indice_superficie(1):indice_superficie(2))=RL_superfi
    cie(1);

    RL_superficie_raytrace(i,indice_superficie(2):numero_colunasxx)=RL_superficie(
    2);

        else
            if interacoes_superficie>2
                RL_superficie_raytrace(i,1:indice_superficie(1))=0;
                for k=2:interacoes_superficie
                    RL_superficie_raytrace(i,indice_superficie(k-1):...
                    indice_superficie(k))=RL_superficie(k-1);
                end
            end
        end

    RL_superficie_raytrace(i,indice_superficie(interacoes_superficie))...

```

```

                                :numero_colunasxx)=RL_superficie(k);
                                else
                                end
                                end
                                end
                                end
                                RL_1=find(~isnan(RL_superficie_raytrace),1);
                                declive=0
                                for k=2:numero_colunasxx
                                %Encontra onde ocorre mudança do valor de RL
                                diferenca=RL_superficie_raytrace(k-1)-RL_superficie_raytrace(k);
                                if diferenca>0
                                    declive=declive+1;
                                %Se a mudança ocorre entre a 1ª e a 2ª interação, então é calculado um
                                %declive m, entre o primeiro valor de reverberação e o 2º que lhe é
                                %diferente.
                                    if declive==1
                                        m=-(RL_superficie_raytrace(RL_1)-RL_superficie_raytrace(k))/(k-RL_1);
                                        for j=RL_1:k-1
                                            RL_superficie_raytrace(j)=RL_superficie_raytrace(RL_1)+m*(j-RL_1);
                                        end
                                        anterior=k;
                                    end
                                %Continua a calcular os declives e a atenuar os valores entre interações.
                                    if declive>1
                                        m=-(RL_superficie_raytrace(anterior)-
                                RL_superficie_raytrace(k))/(k-anterior);
                                        for j=anterior:k-1

                                RL_superficie_raytrace(j)=RL_superficie_raytrace(anterior)+m*(j-anterior+1);
                                        end
                                        anterior=k;
                                    end
                                end
                                end
                                assignin('base','RL_superficie_raytrace',RL_superficie_raytrace)
                                % Matriz final de reverberação, que corresponde ao maior valor para cada
                                % ponto da função raytrace:
                                RL_final_1=max(RL_fundo_raytrace, RL_superficie_raytrace);

                                % Obtém os maiores elementos dos três tipos de reverberações
                                RL_final=max(RL_final_1,RL_volume_final);

                                assignin('base','RL_final',RL_final);

                                %Cálculo do ruído ambiente:
                                %Para o Estado do Mar:
                                if SS==0
                                    ruído_mar=51.8285-7.6227*frequencia+0.9717*frequencia.^2-
                                0.0459*frequencia.^3;
                                elseif SS==1/2
                                    ruído_mar=55.0614-6.7208*frequencia+0.8106*frequencia.^2-
                                0.0373*frequencia.^3;
                                elseif SS==1

```

```

        ruido_mar=58.262-5.7971*frequencia+0.6462*frequencia.^2-
0.0285*frequencia.^3;
    elseif SS==2
        ruido_mar=63.0914-4.6787*frequencia+0.4188*frequencia.^2-
0.0154*frequencia.^3;
    elseif SS==3
        ruido_mar=65.929-3.9829*frequencia+0.2826*frequencia.^2-
0.0077*frequencia.^3;
    elseif SS==4
        ruido_mar=67.6311-3.4708*frequencia+0.1813*frequencia.^2-
0.002*frequencia.^3;
    elseif SS==5
        ruido_mar=69.3144-3.1646*frequencia+0.1114*frequencia.^2-
0.0023*frequencia.^3;
    elseif SS==6
        ruido_mar=71.8288-
3.0857*frequencia+0.094*frequencia.^2+0.0034*frequencia.^3;
    elseif SS==7
        ruido_mar=74.3443-
2.9611*frequencia+0.0632*frequencia.^2+0.0053*frequencia.^3;
    elseif SS==8
        ruido_mar=76.8575-
2.9279*frequencia+0.0591*frequencia.^2+0.0055*frequencia.^3;
    elseif SS==9
        ruido_mar=79.3719-
2.849*frequencia+0.094*frequencia.^2+0.0065*frequencia.^3;
    end

%Para a Precipitação
switch precipitacao
    case 'Ausência de Chuva'
        ruido_chuva=0;
    case 'Fraca (1mm/h)'
        ruido_chuva=51.0769+1.4687*frequencia-
0.5232*frequencia.^2+0.0335*frequencia.^3;
    case 'Moderada (5mm/h)'
        ruido_chuva=61.5358+1.0147*frequencia-
0.4255*frequencia.^2+0.0277*frequencia.^3;
    case 'Forte (10mm/h)'
        ruido_chuva=65.1107+0.8226*frequencia-
0.3825*frequencia.^2+0.0251*frequencia.^3;
    case 'Muito Forte (100mm/h)'
        ruido_chuva=74.3464+1.0131*frequencia-
0.4258*frequencia.^2+0.0277*frequencia.^3;
end

%Para a densidade de navegação de navegação
switch densidade_navegacao
    case 'Baixa'
        ruido_navios=50.7034-21.3545*frequencia+3.5545*frequencia.^2-
0.1954*frequencia.^3;
    case 'Média'
        ruido_navios=64.5478-21.3145*frequencia+3.3387*frequencia.^2-
0.1795*frequencia.^3;

```



```

        case 'Elevada'
            ruido_navios=77.9369-22.423*frequencia+3.7548*frequencia.^2-
            0.2043*frequencia.^3;
        end

        ruido_final_1=max(ruido_navios, ruido_chuva);
        ruido_ambiente=max(ruido_final_1,ruido_mar);

        % cálculo do ruído ambiente de banda:
        ruido_ambiente_banda=ruido_ambiente+10*log10(largura_de_banda*1000)

        %Calibração do navio:
        calibracao=5;
        % Ruído próprio assumido para estado do mar 2:
        SN_SS2=[0,0,0,0.5,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12.5,14.2,15.9,17.6,19.3,21,...
            22.4,23.8,25.2,26.6,28];
        % Ruído próprio assumido para estado do mar 3:
        SN_SS3=[4,4.3,4.4,4.5,4.8,5,5.5,6.5,7,7.5,8,9,9.5,10.5,11.5,12.5,...
            14.2,15.9,17.6,19.3,21,22.4,23.8,25.2,26.6,28];
        % Ruído próprio assumido para estado do mar 4:
        SN_SS4=[7.5,7.5,7.5,7.5,7.5,7.5,8,8,8.5,8.5,9,9.5,10,11,12,13,14.2,...
            15.9,17.6,19.3,21,22.4,23.8,25.2,26.6,28];
        % Velocidades:
        velocidades=0:1:25;

        %Ajuste dos valores de ruído:
        SN_SS2=SN_SS2+calibracao;
        SN_SS3=SN_SS3+calibracao;
        SN_SS4=SN_SS4+calibracao;

        if SS<=2
            SN=spline(velocidades,SN_SS2,velocidade_propria);
        elseif SS==3
            SN=spline(velocidades,SN_SS3,velocidade_propria);
        elseif SS>=4
            SN=spline(velocidades,SN_SS4,velocidade_propria);
        end

        %Resolução das equações sonares:
        %Criar matriz com os raios da função Raytrace:
        raios_matriz=raio_superior:1:raio_inferior;
        raios_matriz=num2cell(-raios_matriz);

        %As equações sonares tem que ser resolvidas raio a raio, assim:

        for i=1:numero_linhasxx

            %Para o sonar activo:
            if sonar_func==1
                for j=1:numero_colunasxx

                    %Primeiro é necessário verificar se o sinal é limitado pelas
                    %reverberações recebidas:
                    if RL_final(i,j)>=(ruido_ambiente_banda+SN);

```

```

Equacao_ativo(i,j)=SL_final-2*TL(i,j)-DT-RL_final(i,j)-
SN+DI_rx+TS;
else
    % Limitado pelo ruído
    Equacao_ativo(i,j)=SL_final-2*TL(i,j)-DT-
(ruido_ambiente_banda+SN)+DI_rx+TS;
end
end

disp(SN)
disp(ruido_ambiente_banda)
% Ver para que índices o valor é positivo
indice_sonar=find(Equacao_ativo(i,:)>=0);
if isempty(indice_sonar)
    indice_sonar=1;
else
    end
% Maior índice em que o valor é positivo, corresponde a distância de deteção
indice_max_ativo(i)=max(indice_sonar);
% Distância de deteção:
distancia_detecao_ativo(i)=xx_propagacao(i,indice_max_ativo(i));

% Coordenadas verticais e horizontais da posição em que passa a ser negativo
% o sinal:
horizontal(i)=distancia_detecao_ativo(i);
% Coordenadas z
vertical(i)=zz_propagacao(i,indice_max_ativo(i));

else
    Equacao_passivo(i,1:length(xx_propagacao(i,:)))=SL_final-TL(i,:)-
(ruido_ambiente_banda+SN)+DI_rx-DT;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Deteta onde o nível de sinal em recetor passivo, SE_pas, é >= 0
indice=find(Equacao_passivo(i,:)>=0);
if isempty(indice) % Caso em que não há excesso de sinal
    indice=1;      % Ou seja alcance nulo ou não deteção
else
    end
% Encontra o índice, onde o sinal é mínimo positivo
ind(i)=max(indice);
% Estimativa de distância com 50% de probabilidade de contradeteção,
% d_detecao_pas, (m)
distancia_detecao_passiva(i)=xx_propagacao(i,ind(i));

% Calcula marca da distância provável de deteção
% Coordenada x da distância de deteção
horizontal(i)=distancia_detecao_passiva(i);
% Coordenadas z
vertical(i)=zz_propagacao(i,ind(i));

end
end

% Coloca marca da distância provável de deteção ou contradeteção
hold on

```

```
% Coloca linha nos alcances sonar previstos
plot(horizontal,-vertical,'o-g')

% Escrita de distancias finais
if sonar_func==1
    distancia_detecao_ativo_media=mean(distancia_detecao_ativo);
    distancia_detecao=distancia_detecao_ativo;

else
    distancia_detecao_passiva_media=mean(distancia_detecao_passiva);
    distancia_detecao=distancia_detecao_passiva;
end

if sonar_func==1
    SE=Equacao_ativo;
    SE=round(SE);
else
    SE=Equacao_passivo;
    SE=round(SE);
end

%Remover os zeros para não aparecerem no gráfico:

for i=1:numero_linhasxx
    for j=1:numero_colunasxx
        if SE(i,j)<-11
            SE(i,j)=NaN;
        else
            end
        end
    end
end

d_detecao_pas_med=mean(distancia_detecao)*0,9144;
set(handles.alcance,'string',sprintf('%0.0f',d_detecao_pas_med));

assignin('base','SE',SE);
assignin('base','distancia_detecao',distancia_detecao);
assignin('base','horizontal',horizontal);
assignin('base','vertical',vertical);

%Faz o plotting do alcance sonar
raios=raio_superior:-1:raio_inferior;
raios=num2cell(raios);
assignin('base','raios',raios)
hold on
plot(horizontal,-vertical,'o-r')
text(horizontal,-vertical,raios')
hold off

axes(handles.axes19)
SE=round(SE);
inf=-30;
SE(SE<-30)=nan;
grad=min(min(SE)):5:SL_final;
```

```

contourf(real(xx_propagacao),real(-
zz_propagacao),real(SE),real(grad),'ShowText','on')
colormap(hsv)
axis([0 t_propagacao*1500 min(profundidade_perfil) 0])

xlabel('Distância (m)')
ylabel('Imersão (m)')
%Coloca o alcance sonar
hold on

% Coloca linha a unir os alcances de deteção previstos
%plot(vertical,-horizontal,'o-g')

% Escreve o número de sequência dos raios
%text(vertical,-horizontal,raios')
% Grafica o perfil do fundo
plot(dist_geodesica,profundidade_perfil,'k')
hold off

assignin('base','ruído_ambiente_banda',ruído_ambiente_banda);
assignin('base','distancia_total',distancia_total);
assignin('base','numero_colunasxx',numero_colunasxx);
assignin('base','numero_linhasxx',numero_linhasxx);
end

% --- Executes on button press in rever.
function rever_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to rever (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of rever
axes(handles.axes3)
cla
axes(handles.axes4)
cla
axes(handles.axes5)
cla
axes(handles.axes19)
cla
axes(handles.axes2)
cla
axes(handles.axes6)
cla
axes(handles.axes18)
cla
axes(handles.axes20)
cla
%Definir quais os gráficos que devem ficar visíveis:
set(handles.axes19,'visible','off')
set(handles.axes18,'visible','off')
set(handles.axes2,'visible','off')
set(handles.axes3,'visible','off')

```

```

set(handles.axes4,'visible','off')
set(handles.axes5,'visible','off')
set(handles.axes6,'visible','off')
set(handles.axes20,'visible','on')
set(handles.painel_escolha,'visible','off')
set(handles.XBT_tabela,'visible','off')
set(handles.XSV_tabela,'visible','off')
set(handles.alcance,'visible','off')
set(handles.distancia,'visible','off')

%Lê as variáveis do gráfico das curvas de reverberação
ruído_ambiente_banda=evalin('base','ruído_ambiente_banda');
disp(size(ruído_ambiente_banda))
distancia_total=evalin('base','distancia_total');
disp(size(distancia_total))
numero_colunasxx=evalin('base','numero_colunasxx');
disp(size(numero_colunasxx))
numero_linhasxx=evalin('base','numero_linhasxx');

for i=1:numero_colunasxx
    anl(i)=ruído_ambiente_banda;
    distancia_media(i)=mean(distancia_total(:,i),'omitnan');
end

RL_volume=evalin('base','RL_volume');
RL_fundo=evalin('base','RL_fundo_raytrace');
RL_superf=evalin('base','RL_superficie_raytrace');

axes(handles.axes20)
xlabel('Distância (m)')
ylabel('dB/μPa')
hold on
h=plot(distancia_media,anl,'--g');
set(h,'Tag','ANL')
h=plot(distancia_media,RL_fundo(7,:), 'o-g');
set(h,'Tag','RL1')
h=plot(distancia_media,RL_volume(7,:), 'o-r');
set(h,'Tag','RL2')
h=plot(distancia_media,RL_superf(7,:), 'o-b');
set(h,'Tag','RL3')

legend('Ruído Ambiente de Banda (dB)', 'RL fundo (dB)', 'RL volume (dB)', 'RL
superficie (dB)', ...
'location','northeast')
hold off

end

function alcance_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to alcance (see GCBO)

```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of alcance as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of alcance as a
double
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function alcance_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to alcance (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
end
```